

RECO

Réseau d'expertise sur les changements climatiques en Occitanie

Cahier Régional Occitanie sur les Changements Climatiques

Édition 2021



Le CROCC 2021 bénéficie du soutien financier de :





CRÉDITS ET REMERCIEMENTS

Coordination générale : Guillaume SIMONET

Appui à la coordination : Julie FABRE, Virginie HUGUES

Infographisme et maquetage : Abstraction Services

Le maquetage a été réalisé via InDesign sous la licence gracieusement partagée de la MSH-SUD.

Crédit photo couverture : Cirque dolomitique de Mourèze, par Melkan Bassil / www.imagesoccitanie.com. Photo généreusement cédée par l'auteur.

Mise en ligne sur le site web : Ideae Pays Basque

Le CROCC_2021 a été réalisé par le Réseau d'Expertise sur les Changements climatiques en Occitanie (RECO) sous la coordination générale de Guillaume SIMONET avec l'appui de Julie FABRE et Virginie HUGUES.

Le projet a bénéficié d'un financement de la Région Occitanie, de l'ADEME et d'une aide du LabEx AGRO 2011-LABX-002 intégré à l'I-site Muse et coordonné par Agropolis Fondation. Le laboratoire Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages (G-EAU), le Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires (LISST) et la Maison des Sciences de l'Homme SUD ont également soutenu financièrement le projet.

L'équipe du RECO tient à remercier l'ensemble des personnes qui ont contribué à la rédaction des textes ainsi que les institutions auxquelles elles appartiennent. Leur contribution est mentionnée au niveau de chaque texte et chapitre. Si vous souhaitez citer certains éléments du CROCC_2021, merci de faire référence au texte ou chapitre en question en citant l'ensemble de ses auteurs. Nous remercions également chaleureusement les membres des deux comités (Scientifique et Territorial) mis en place pour l'élaboration du CROCC_2021 et en saluons le travail et la patience. Enfin, nous remercions toutes les personnes dont les aides diverses et encouragements ont permis la bonne démarche de cette réalisation.

Avertissement : cette 1^{re} édition du CROCC éclaire les enjeux des changements climatiques en Occitanie sans pour autant les traiter de manière exhaustive. Les opinions et résultats présentés dans les textes du CROCC_2021 sont entièrement de la responsabilité des auteurs et n'engagent qu'eux.



Abstraction Services
Adaptation aux changements climatiques
Accompagnement, Formation, Recherche
www.abstraction-services.com





GOUVERNANCE DU CROCC_2021

PILOTAGE : ÉQUIPE D'ANIMATION DU RECO

Sylvain BARONE (INRAE - G-EAU)

Julie FABRE (RECO - consultante)

Julia HIDALGO (CNRS - LISST)

David SALAS Y MELIA (Météo-France/CNRS - CNRM)

Guillaume SIMONET (RECO)

Appui externe : Virginie HUGUES (consultante)

COMITÉ SCIENTIFIQUE

Climat Régional : David SALAS Y MELIA (Météo-France/CNRS - CNRM) et Jean-Michel SOUBEYROUX (Météo-France - DCSC)

Biodiversité : Bertrand SCHATZ (CEFE) et Bénédicte GOFFRE (ARB Occitanie)

Eau : Sylvain BARONE (INRAE) et Pierre CHEVALLIER (IRD)

Agrosystèmes : Philippe DEBAEKE (INRAE) et Jean-Marc TOUZARD (INRAE)

Santé : Virginie HUGUES (consultante)

Milieux urbanisés : Julia HIDALGO (LISST) et Christiane WEBER (TETIS)

Milieux littoraux : Yann BALOUIN (BRGM Occitanie), Hélène REY-VALETTE (CEE-M)

Milieux montagnards : Virginie HUGUES (consultante) et Juan TERRADEZ (OPCC)

Tourisme : Émeline HATT (LIEU) et Vincent VLÈS (CERTOP)

Mobilité et Énergie : Bruno REVELLI (LISST) - Julie FABRE (consultante) et Virginie HUGUES (consultante)

Gouvernance : Laura MICHEL (CEPEL) et Julien WEISBEIN (LaSSP)

Aspects Psychosociaux : Elsa CAUSSE (CHROME) et Béatrice JALENQUES-VIGOUROUX (LERASS)

COMITÉ TERRITORIAL

Myriam DUCASSE (Chargée de mission politiques régionales Énergie-Climat - DREAL Occitanie)

Marie-Laurence DUSFOURD (Directrice de projet changement climatique - Région Occitanie)

Vincent GLACHANT (Chargé de mission territoires durables - ADEME Occitanie)

Morgane VILLETARD (Animatrice régionale Occitanie SafN - projet Life intégré ARTISAN - ARB Occitanie)

AVANT-PROPOS

Le rugby est sans conteste une des identités culturelles marquées de l'Occitanie. Au delà de l'abnégation, du respect ou du partage, la pratique optimale de ce sport exige surtout des aptitudes collectives fortes en termes de solidarité, de communication ou encore d'adaptation de l'organisation en place au jeu adverse. Cette analogie nous semble particulièrement pertinente pour imaginer les compétences indispensables à déployer face à une évolution climatique et globale qui s'accélère.

Ainsi, l'Occitanie s'inspirera-t-elle de **l'engagement collectif** de ses pratiquant.e.s de rugby pour s'adapter à des changements climatiques qui se cumulent aux multiples pressions anthropiques qui s'exercent sur ses territoires ? Car au delà d'une protection accrue face à des aléas climatiques de plus en plus violents, il s'agit désormais d'accélérer une profonde transformation dans nos modes de vies, nos manières de produire et nos liens avec un monde vivant non-humain en grande souffrance.

En effet, les années passent et leur cortège de dommages humains et matériels s'étoffe au gré d'impacts climatiques qui s'intensifient. Les changements climatiques *n'impacteront* pas tel ou tel aspect : ils **sont en train** d'impacter l'ensemble de la planète. Le temps où l'on conjugait l'évolution climatique d'origine anthropique au futur est révolu : nous entrons désormais dans les possibles qu'envisageaient les modèles climatiques des premiers rapports du GIEC, il y a plus de 30 ans.

Face à cette réalité, chaque acteur n'a plus d'autre choix que de jouer sa partition du mieux possible. Pour la communauté scientifique qui travaille sur la question climatique, 2021 est une année dense, marquée notamment par la sortie du tome 1 du 6^e rapport du GIEC (**voir annexe 1**) et par celle d'une inédite collaboration entre le GIEC et l'IPBES (**voir annexe 2**). Au-delà de nouvelles données, le ton réaffirmant l'urgence de **réorganiser** nos modes de vie affiche davantage de fermeté que les constats précédents.

S'inscrivant dans cette lignée, le RECO publie avec le CROCC_2021 le premier état des lieux scientifique sur les tendances et les impacts climatiques à l'échelle de notre « **petite planète occitane** », comme la nomme Melkan Bassil, le créateur de la photo qui en illustre la couverture. Il nous apparaissait essentiel que notre région se dote d'un tel document de référence, au même titre que ceux publiés par nos homologues AcclimaTerra, pour la Nouvelle-Aquitaine (en 2013, mis à jour en 2018) et le GREC-SUD, pour la région PACA (en 2015).

Ce cahier régional complète l'état des lieux scientifique sur les changements climatiques du sud de la France, de l'Atlantique à la frontière italienne. C'est donc avec un **décloisonnement régional** qu'il doit se parcourir puisque complémentaire aux deux rapports régionaux de nos voisins, notamment pour les enjeux communs tels que ceux liés au littoral méditerranéen, aux Pyrénées ou à l'eau, compte tenu des bassins versants partagés.

Enfin, le CROCC_2021 souhaite également mettre en exergue le dynamisme de la communauté scientifique régionale qui travaille sur la question climatique. Autant de scientifiques, de laboratoires et d'entités de recherche qui observent, analysent et étudient les évolutions climatiques et leurs implications sur les populations, les activités ou la biodiversité. Si le RECO peut vous présenter aujourd'hui le CROCC_2021, c'est essentiellement grâce à **l'engagement** des **214** personnes qui ont contribué à la rédaction de la centaine de textes qui composent ces 12 chapitres.

En vous souhaitant une lecture inspirante.

Guillaume SIMONET
Coordonnateur du RECO



Se regrouper pour mieux avancer

Rassembler et articuler les contributions dans une démarche collective



Contourner les obstacles

Cadrer, déborder puis raffuter les impacts climatiques à l'échelle territoriale



Transférer les savoirs

Faciliter la diffusion des connaissances scientifiques et des savoirs locaux



Conception graphique : -Abstraction Services, 2020



Accélérer l'action climatique

Aider à la mise en place de stratégies d'adaptation face aux enjeux climatiques



Se soutenir et viser haut

Créer du lien et tisser des synergies entre scientifiques, travaux et structures



Capitaliser l'effort collectif

Publier le Cahier Régional l'année de sortie du 6^{ème} rapport du GIEC





ÉDITO de la Région Occitanie

Plus que jamais, l'Occitanie fait face au défi du changement climatique. Outre l'observation d'une évolution significative de notre climat, les impacts sur notre environnement, nos ressources et activités sont vivement ressentis. La publication du 6^e rapport du GIEC ne laisse plus place aux questionnements : dans un contexte d'accélération et d'intensification du changement climatique, chaque demi-degré, chaque année, chaque choix compte. Le temps est désormais celui d'une mise en action rapide pour lutter contre les effets du changement climatique.

Nos concitoyens et les jeunes générations ont déjà saisi la mesure des enjeux : la protection du climat, afin de nous assurer un avenir viable, figure en tête de leurs préoccupations.

Par son action concrète, la Région Occitanie a déjà accéléré et intensifié ses initiatives visant à prendre la mesure de l'urgence climatique et à construire collectivement un nouveau modèle de développement adapté à notre territoire.

Bâtir une Région inclusive et une Région à Énergie positive, c'est construire une trajectoire de transition globale intégrant les deux stratégies complémentaires pour répondre aux enjeux climatiques : s'adapter au changement climatique et atténuer les émissions de gaz à effet de serre. C'est aussi embarquer les parties prenantes autour d'objectifs communs à atteindre et d'outiller les territoires pour une mise en œuvre opérationnelle de stratégies d'adaptation et d'atténuation plus efficaces.

Diffuser et s'appuyer sur les connaissances scientifiques et citoyennes, rapprocher les réseaux, partager les initiatives dans le but d'éclairer les décisions et d'accompagner le passage à l'acte sont essentiels. Aussi, la Région Occitanie a souhaité soutenir l'initiative du RECO d'un 1^{er} état des lieux des connaissances scientifiques qui permet de fournir, aux acteurs publics et privés, les données et des exemples pour mieux anticiper le changement climatique.

Carole DELGA

Présidente de la Région Occitanie / Pyrénées-Méditerranée



ÉDITO de l'Agence de la transition écologique (ADEME)

Les conditions climatiques en France vont profondément évoluer au cours du XXI^e siècle. Pour les organisations comme pour les citoyens, il est nécessaire de s'adapter pour rendre notre société plus robuste et résiliente.

S'adapter au changement climatique et lutter contre celui-ci sont des actions complémentaires : il est primordial de maintenir le réchauffement climatique en dessous des +2 °C. Au-delà de 2 °C, l'ampleur et l'imprévisibilité des impacts peuvent être tels qu'il sera difficile de définir des trajectoires d'adaptation.

L'adaptation est une nécessité, mais peut s'avérer être aussi une opportunité économique et sociale. Si l'évolution de notre environnement avec le climat est porteuse de risques, l'adaptation à ces changements est intrinsèquement porteuse de transformation des territoires, d'innovations techniques, organisationnelles et sociales.

L'ADEME œuvre pour favoriser les solutions d'adaptation au changement. Ses objectifs sont :

- faciliter le passage à l'action,
- accompagner le développement de nouvelles connaissances et l'innovation,
- contribuer à l'expertise collective.

En Occitanie les effets du changement climatique se font déjà sentir avec notamment :

- l'augmentation des températures moyennes (environ +0,4 °C par décennie sur les 30 dernières années)
- des précipitations plus abondantes empêchant l'infiltration dans les sols et augmentant les risques d'inondations.

L'ADEME est force de proposition à travers sa participation à la structuration d'une gouvernance locale sur ces thématiques, l'amélioration des connaissances sur des sujets tels que l'agroforesterie, l'évolution du climat dans la région ou la création de fiches action à destination des collectivités. Elle soutient également les collectivités dans la mise en place de stratégies d'adaptation (outil TAACT).

Enfin en 2021, l'ADEME est heureuse de soutenir le CROCC qui rend les travaux de recherches régionaux accessibles car rassemblés, recoupés et vulgarisés au bénéfice de stratégies d'adaptation appropriables par les territoires.

Michel PEYRON
Directeur Régional de l'ADEME en Occitanie



ÉDITO de l'Agence Régionale de la Biodiversité Occitanie

Deux crises majeures menacent la viabilité de nos sociétés à une échelle globale, régionale et locale : le changement climatique et l'effondrement de la biodiversité. Alors que l'approche adoptée pour aborder ces crises est historiquement cloisonnée, avec notamment une visibilité plus forte donnée au sujet du climat, nous devons aujourd'hui prendre rapidement conscience qu'elles ne peuvent être considérées qu'indissociablement.

La crise climatique et la perte de biodiversité étant étroitement liées et se renforçant mutuellement, aucune de ces crises ne pourrait être résolue sans être abordées conjointement, comme le souligne le travail issu d'une collaboration inédite du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) et de l'IPBES (Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques). Il est donc vital pour nos sociétés d'opérer un changement profond par la mise en place, rapide et de grande ampleur, de solutions pour atténuer et s'adapter au changement climatique tout en préservant et restaurant la biodiversité.

Or ces solutions existent. Elles sont nombreuses, efficaces, avec de multiples bénéfices socio-économiques et pourtant elles sont souvent méconnues ou sous-estimées : les Solutions fondées sur la Nature. Ces solutions s'appuient sur les fonctionnalités des écosystèmes naturels qui, lorsqu'ils sont préservés, gérés durablement et/ou restaurés, jouent un rôle fondamental dans l'atténuation du changement climatique (stockage de carbone) et dans l'adaptation de nos territoires à ses effets en réduisant les impacts des risques naturels (inondation, submersion, érosion, sécheresse, canicule, etc.).

Il est donc primordial de valoriser ces solutions et d'inverser le schéma actuel en incitant les décideurs et porteurs de projets à les considérer non plus comme des alternatives mais comme la première option à envisager. Le projet Life intégré ARTISAN (Accroître la Résilience des Territoires au changement climatique par l'Incitation aux Solutions d'Adaptation fondées sur la Nature), piloté par l'Office Français de la Biodiversité et s'appuyant sur 27 bénéficiaires associés, participe à cet objectif par la création, d'ici 2027, d'un cadre propice à la généralisation du recours aux Solutions d'adaptation fondées sur la Nature en France.

Hervé BLUHM

Président *p.i.* de l'Agence Régionale de la Biodiversité Occitanie



SOMMAIRE

RÉSUMÉ POUR DÉCIDEURS

Messages transversaux > p. 10

Messages par chapitres > p. 11

Chapitre 0 - Introduction générale > p. 16

PARTIE ÉCOSPHÈRE

Chapitre 1 - Climat régional > p. 25

Chapitre 2 - Biodiversité > p. 38

Chapitre 3 - Eau > p. 65

Chapitre 4 - Santé > p. 83

PARTIE MILIEUX

Chapitre 5 - Milieux urbanisés > p. 101

Chapitre 6 - Milieux littoraux > p. 126

Chapitre 7 - Milieux montagnards > p. 147

PARTIE ACTIVITÉS

Chapitre 8 - Agrosystèmes > p. 165

Chapitre 9 - Tourisme > p. 192

Chapitre 10 - Énergie et Mobilité > p. 207

Chapitre 11 - Gouvernance > p. 220

Chapitre 12 - Enjeux Psychosociologiques > p. 232

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE > p.246

LISTE DES ACRONYMES > p.261

LISTE DES PERSONNES AYANT CONTRIBUÉ AU CROCC_2021 > p.262

LISTE DES AFFILIATIONS DES CONTRIBUTIONS > p.264

ANNEXES > p.266

L'ÉQUIPE D'ANIMATION DU RECO > p.268



RÉSUMÉ POUR DÉCIDEURS

MESSAGES TRANSVERSAUX

Approfondir le partage du diagnostic pour accélérer un passage durable à l'action.

Le changement climatique déjà mesurable en Occitanie se poursuivra au moins jusqu'en milieu de siècle, voire au-delà, et continuera à affecter à la fois les milieux naturels, les populations et les activités socioéconomiques. Il est désormais essentiel d'entamer une réflexion systémique pour ne pas se limiter aux réorganisations à la marge et éviter les adaptations contre-productives. Il est nécessaire d'approfondir le partage du diagnostic sur les impacts du changement climatique par l'ensemble des acteurs du territoire afin d'engager un véritable passage à l'action à toutes les échelles.

Être vigilant à la multiplication des pressions complexifiant les adaptations à engager et exposant à un risque d'actions antagonistes.

La rencontre des impacts climatiques et des pressions anthropiques multiplie les risques pour les territoires et leurs parties prenantes. Bien qu'avérée à travers une forte hausse des vulnérabilités, cette multiplication complexifie l'identification de l'influence de chacun des facteurs (climatiques et anthropiques) sur les changements observés et crée un risque de mise en place de réponses antagonistes dans leurs objectifs. Ce risque incite à une vigilance sur les impacts multiples ou en chaîne de chaque action.

Penser et agir sur la combinaison des risques.

L'objectif d'une gestion davantage intégrée des milieux et des risques devrait déboucher sur des réflexions concernant l'évolution des modes de délibération et de décision afin de mieux prendre en compte l'interconnexion des territoires et les effets réels et potentiels des combinaisons de risques accentués par le changement climatique.

Allier savoirs dits ordinaires et savoirs experts pour mieux observer et mieux s'adapter.

Une implication des citoyens, riverains, membres d'associations dans l'observation de l'évolution des territoires, dans les diagnostics des impacts climatiques et dans la construction de pistes d'adaptation permettrait l'émergence d'un savoir plus riche et mieux partagé sur le changement climatique en Occitanie. Le dialogue entre savoirs ordinaires et savoirs experts pourrait favoriser l'appropriation par les acteurs territoriaux du diagnostic sur les impacts du changement climatique et pourrait être de nature à mieux asseoir les stratégies ou actions locales d'adaptation. La co-construction de réponses locales, l'expérimentation, les projets pilotes, les jeux sérieux sont autant de pratiques qui pouvant favoriser l'engagement des parties prenantes.

Élaborer une réponse coordonnée engageant les solidarités territoriales.

Les impacts du changement climatique tendent à accentuer les inégalités sociales et territoriales. Une réponse coordonnée à l'échelle régionale devrait prendre en compte les interdépendances entre territoires (ruraux et urbains, amont et aval, piémont et littoral, etc.) et intégrer l'enjeu des solidarités sociales et territoriales à différentes échelles.

Combiner les pistes de solutions de toutes sortes.

L'adaptation au changement climatique des territoires, des activités, et des populations ne pourra se concrétiser qu'à travers une combinaison de réponses et d'instruments (réglementation, incitation, communication, solutions vertes et grises, *low tech* et *high tech*, etc.), à condition de rester attentifs aux potentiels effets pervers de certains dispositifs ou combinaisons de dispositifs et en encourageant des actions structurelles qui réorganisent profondément les usages et les pratiques.

RÉSUMÉ POUR DÉCIDEURS

MESSAGES PAR CHAPITRES

1. Climat Régional

- Le changement climatique déjà mesurable en Occitanie grâce aux observations est essentiellement dû aux activités humaines. En particulier, le réchauffement moyen en Occitanie est estimé à environ 1,8 °C entre les périodes 1901-1920 et 2001-2020. Il se traduit notamment par des extrêmes chauds plus fréquents, et des extrêmes froids moins fréquents. Les cumuls annuels de précipitations ont légèrement diminué, mais les pluies extrêmes tendent à devenir plus intenses.
- Le climat de l'Occitanie continuera à évoluer plus rapidement que la moyenne planétaire au moins jusqu'en milieu de siècle. Il est estimé que, par rapport à 1901-1920, le climat de 2025-2044 sera plus chaud de 2,3 à 2,7 °C, et celui de 2041-2060 de 2,3 à 3,2 °C. Au-delà, le niveau de réchauffement dépendra fortement des actions entreprises pour réduire les émissions humaines de gaz à effet de serre : en 2081-2100, la hausse des températures par rapport à 1901-1920 est estimée à environ 2,3 °C dans le scénario RCP2.6 (forte réduction des émissions), à 3,4 °C (scénario médian) et 5,6 °C (fortes émissions).
- Les tensions sur la ressource en eau vont augmenter, avec des cumuls annuels de précipitations en baisse (de l'ordre de 5 % en milieu de siècle, et jusqu'à 14 % dans le scénario RCP8.5 en fin de siècle), des changements de répartition des précipitations sur l'année, des pluies extrêmes plus fortes et des sécheresses, notamment des sols, plus fréquentes et plus intenses.
- Les évolutions climatiques à venir vont affecter fortement les milieux naturels, la santé et les activités humaines (agriculture, énergie, tourisme hivernal et estival...).

2. Biodiversité

- Seule région de France métropolitaine sur quatre domaines bioclimatiques, l'Occitanie présente une biodiversité riche en faune, flore et fonge, avec une responsabilité régionale forte pour sa conservation dont la lutte contre le changement climatique et ses effets. Cette biodiversité représente souvent plus de 80 % de celle présente au niveau national, même si certains groupes restent encore à mieux documenter. Nombreuses sont les espèces endémiques en montagne et dans certains habitats spécifiques (Grands Causses, littoral). Les zones de forte conservation sont à accroître et à étendre aux secteurs à fort enjeux. Le Système d'information de l'inventaire du patrimoine naturel (SINP) d'Occitanie, les sciences participatives et les opérations d'éducation à l'environnement doivent être soutenues pour développer et diffuser la connaissance de cette biodiversité et de ses enjeux.
- L'agriculture intensive régionale (utilisant encore de nombreux pesticides, engrais et drainages) doit réaliser une transition agroécologique forte pour améliorer sa capacité d'adaptation au changement climatique. Cette transition passe notamment par le développement d'alternatives à l'usage des pesticides, la diversification des plantes cultivées et des essences forestières. L'agroécologie et l'agriculture biologique, les initiatives locales, les filières courtes, l'installation de jeunes agriculteurs dans cette dynamique et les solutions fondées sur la nature doivent être renforcées.
- L'urbanisation et l'artificialisation du territoire doivent être mieux encadrées par les collectivités afin de limiter leurs impacts négatifs et d'atteindre l'objectif de « zéro artificialisation nette » (par densification de l'existant, optimisation de l'utilisation des sites, mutation des sites abandonnés, et une compensation écologique ambitieuse et efficace). Les techniques de dépollution et de déconstruction, l'habitat et les équipements touristiques compatibles avec la biodiversité doivent renforcer sa conservation et améliorer la qualité du cadre de vie.

3. Eau

• Le changement climatique a d'ores et déjà des effets tangibles dans ce domaine : précipitations plus faibles en été mais plus fortes et plus fréquentes en automne et en hiver, réduction de la couverture neigeuse, augmentation de l'évapotranspiration, déficits de recharge des aquifères plus ou moins importants selon les endroits, débits d'étiage plus bas, réduction des débits des fleuves côtiers et à l'inverse augmentation (hors été) des débits dans les bassins de l'Adour et de la Garonne, inondations par ruissellement plus conséquentes et accentuées par l'artificialisation des sols... Les impacts notables à l'horizon 2050 s'accroissent encore à l'horizon 2100 pour tous les scénarios.

• Deux enjeux majeurs sont identifiés pour les années et décennies à venir : d'une part, l'atteinte ou la préservation de l'équilibre, notamment en période d'étiage, entre des usages variés, évolutifs, parfois mal connus et des ressources qui devraient structurellement s'amenuiser, et la nécessité d'intégrer pleinement dans la balance les besoins des écosystèmes ; et d'autre part, la gestion du « trop » d'eau, qui touche déjà de façon extrêmement forte certaines zones de la région.

• Pour l'ensemble des enjeux, les réponses techniques (optimisation du fonctionnement des réseaux d'eau potable et des dispositifs d'irrigation, projets – parfois très controversés – de stockage, valorisation des eaux de pluie ou des eaux usées traitées, ouvrages de protection contre les inondations, etc.) ne peuvent plus conduire à faire l'économie de réflexions plus systémiques sur les manières de penser et de pratiquer l'aménagement du territoire, l'urbanisme, l'agriculture, le tourisme, etc., ainsi que sur les manières de gouverner les territoires, de délibérer collectivement et de construire des compromis.

4. Santé

• La santé doit être envisagée au prisme d'une santé « planétaire », « écosystémique » au sens large et non plus de manière cloisonnée en différenciant la santé humaine de la santé animale notamment. Cette nouvelle approche doit permettre de replacer l'Humain dans son écosystème et de mieux en comprendre les interactions (entre espèces, milieux...) pour se prémunir de crises sanitaires.

• L'étude des impacts des changements climatiques sur la santé nécessite un travail pluridisciplinaire et transversal. Le croisement des savoirs (dans les disciplines sanitaires, mais pas que) doit permettre d'apporter une réponse plus adaptée aux défis sanitaires en cours et à venir, dans un contexte de changements climatiques (médecine humaine et médecine animale ; médecins et écologues, etc.).

• D'autres champs de compétences/disciplines doivent être explorés et mobilisés (les sciences comportementales, la psychologie) afin d'apporter une réponse efficace aux défis sanitaires et aborder les troubles de santé mentale générés par les changements climatiques. Le sujet émerge mais les recherches doivent être approfondies pour traiter d'autres effets des changements climatiques sur la santé encore trop méconnus (santé mentale).

• Une des solutions aux défis sanitaires et climatiques réside dans la protection de la biodiversité et la réintroduction de la biodiversité en ville dans les milieux urbanisés. La biodiversité, et les SfN/SafN doivent être au cœur des politiques et programmes de santé publique.

5. Milieux urbanisés

• Les territoires urbanisés d'Occitanie sont exposés à divers aléas naturels. Le peuplement croissant du littoral expose les habitants et les touristes aux risques d'érosion de la ligne de côte et de submersion des zones basses. L'intensification des épisodes méditerranéens constitue un risque supplémentaire compte tenu d'une urbanisation diffuse. Les événements extrêmes (pluies, inondations, vague de chaleur...) impactent fortement les zones de peuplement, divers aléas comme le gonflement des argiles qui endommagent les structures bâties, ou les départs de feux à proximité de lieux d'habitation, mettent déjà le territoire en tension. Enfin, en milieu urbain l'augmentation de l'intensité, la durée et la fréquence des vagues de chaleur combinée à l'effet d'îlot de chaleur urbain constitue un risque composite qui rend de plus en plus difficile la gestion du confort d'été dans cette région du sud de la France.

• Attention aux mesures d'adaptation trop énergivores. Les stratégies d'adaptation en ville sont variées mais celles-ci peuvent avoir des impacts environnementaux et sociaux négatifs importants. Si on se focalise sur la gestion du confort thermique estival, plusieurs stratégies tirant parti du potentiel thermorégulateur naturel sont possibles. La préservation et le renfort des zones arborées et arbustives, un cycle de l'eau non dégradé, une préservation des capacités de ventilation à toutes les échelles (couloir de ventilation à l'échelle urbaine et intra-urbaine, habitations traversantes à l'échelle du bâtiment), une réflexion sur les matériaux utilisés, la forme urbaine et les rythmes de vie sont autant de leviers non énergivores qui peuvent être développés. Le recours à la climatisation est l'exemple le plus courant de mal-adaptation. Non seulement elle consomme de l'énergie et contribue de ce fait au réchauffement climatique global. Localement, la chaleur rejetée réchauffe encore plus l'air extérieur.

• Il est nécessaire d'établir un suivi de long terme des politiques et réorganisations sociales en lien avec l'adaptation au changement climatique en milieu urbain qui implique les citoyens. Comprendre la ville et ses vulnérabilités vis-à-vis du changement climatique nécessite l'utilisation de données d'origine multiples et hétérogènes dont l'accessibilité doit être adaptée à une grande diversité d'interlocuteurs : acteurs de la recherche, collectivités locales, industriels, ONG, citoyens... De nombreuses informations quantitatives et qualitatives sont ainsi collectées par les agences publiques, les bureaux d'étude, ou encore les études de recherche ou d'opinion mais elles nécessitent encore des efforts de structuration et d'accessibilité.

6. Milieux littoraux

• Les risques littoraux, associés notamment à la submersion marine sont amenés à s'accroître dans le futur en raison de l'élévation du niveau de la mer, et il convient désormais de mettre en œuvre simultanément les mesures de protection, d'adaptation par la recomposition de l'espace littoral, et d'atténuation et de mitigation visant à restaurer le rôle protecteur des écosystèmes. Pour mettre en œuvre l'adaptation, une meilleure connaissance systémique des effets induits par le changement climatique, associée aux perspectives et volontés de développement territorial, d'urbanisation et de tourisme est nécessaire, ainsi qu'une adaptation de certains dispositifs institutionnels et des procédures d'assurance.

• L'observation des effets du changement climatique et en particulier les aléas d'érosion et de submersion marine doit être systématisée pour une meilleure caractérisation et anticipation des phénomènes. De plus la mise en place de systèmes de suivi plus réguliers et l'évolution des pratiques et des politiques d'adaptation permettrait de planifier au fur et à mesure en fonction des évolutions environnementales et sociales.

• La biodiversité dans les écosystèmes aquatiques sur le littoral sera impactée par l'augmentation de la température, les phénomènes extrêmes (vagues de chaleur) et l'augmentation de la pression partielle du CO₂ qui induit une acidification des eaux. Ce changement climatique a tendance à renforcer l'impact négatif des pressions anthropiques sur les écosystèmes aquatiques, notamment pour l'eutrophisation et la contamination chimique. Ainsi, l'impact positif des politiques publiques mises en œuvre pour améliorer les qualités écologiques des écosystèmes aquatiques depuis deux décennies risquent d'être compromises par le changement climatique. Par conséquent, les flux maximaux admissibles doivent être revus à la baisse dans ce contexte.

• Il est nécessaire de prendre en compte les effets du changement climatique sur les inégalités environnementales (inégalités d'accès aux ressources, les inégalités de vulnérabilité et les inégalités dans la participation des populations concernées à la définition, et la mise en œuvre des mesures d'adaptation). Les politiques d'adaptation impliquent des mutualisations et interactions à différentes échelles et des nouvelles solidarités territoriales, notamment entre littoral et littoral.

7. Milieux montagnards

• Les écosystèmes montagnards sont particulièrement sensibles et vulnérables aux changements climatiques et constituent un habitat pour une faune très spécifique ou endémique.

• Les effets des changements climatiques en milieux montagnards sont multiples, transversaux et interreliés. Cette complexité rend difficile l'identification formelle des impacts et de nombreux sujets manquent encore de recherches et de données pour affirmer certaines tendances.

> Les tendances et estimations que nous pouvons toutefois dégager doivent être nuancées car à une échelle plus fine (une vallée, un cours d'eau), les évolutions climatiques sont très complexes et ces espaces peuvent parfois constituer des refuges pour les espèces à moyen terme malgré des évolutions plus globales et parfois plus conséquentes à l'échelle de la région.

> Il existe de nombreuses interactions entre les activités économiques, les usages des ressources naturelles et les écosystèmes. L'effet combiné des activités anthropiques (changements dans l'utilisation des terres, pollution et perte d'habitat) et des changements climatiques (principalement les températures, l'enneigement, les précipitations) complexifie l'identification de l'influence de chacun de ces facteurs sur les changements observés.

• Les conséquences des changements climatiques en montagne ne sont pas toutes néfastes. Des opportunités existent en termes d'agriculture, de tourisme, d'économie, de production d'énergie.

8. Agrosystèmes

- Les aléas climatiques plus fréquents conduisent déjà les éleveurs d'Occitanie à adapter leurs systèmes fourragers pour préserver la pérennité de leurs exploitations. Des initiatives/ressources pour l'accompagnement (ateliers participatifs, jeux sérieux) sont à inventer/promouvoir/soutenir pour aider les acteurs à mobiliser les leviers les plus efficaces.
- L'agriculture de conservation des sols fait l'objet d'une forte attente de la part des gestionnaires de l'eau en Occitanie : les travaux doivent être soutenus et poursuivis afin d'objectiver les réussites et de comprendre les échecs.
- Rechercher des alternatives au maïs irrigué peut passer par une diversification des systèmes de culture (oléagineux et protéagineux) dans le cadre de systèmes plus sobres en eau et pouvant contribuer aux enjeux de réduction des pesticides, d'autonomie protéique et de résilience face aux aléas climatiques.

9. Tourisme

- Les scientifiques alertent sur le terrain depuis plusieurs décennies sur la nécessité de mettre en place des actions à la hauteur de l'enjeu climatique (stations de sports d'hiver notamment), mais ces recommandations sont peu prises en compte par les gestionnaires des territoires touristiques face aux enjeux économiques et à l'injonction d'attractivité des territoires. Cet enjeu gagnerait à être mieux pris en compte dans les documents de planification stratégiques (PLU, SCOT, schémas de développement touristique départementaux ou régionaux) et les actions mises en œuvre (qui relèvent encore trop souvent de la mal-adaptation : augmentation du recours à la neige de culture, réensablement des plages...). Par ailleurs, les questions des mobilités touristiques doivent faire l'objet d'un traitement très approfondi avec la mise en place d'une agence de la mobilité, afin d'offrir un service d'accompagnement personnalisé au changement modal.
- Si l'appréhension de l'enjeu climatique et les réponses à apporter dans le domaine du tourisme doivent être adaptées localement, elles doivent également être envisagées dans une perspective multiscalaire (à l'échelle de la destination touristique, de la vallée en montagne, en pensant les relations littoral/arrière-pays sur le littoral...).
- La mise en place d'actions à la hauteur de l'enjeu climatique suppose au préalable la production d'une connaissance scientifique plus fine des impacts du tourisme sur le dérèglement climatique et inversement, du dérèglement climatique sur les territoires touristiques (des données ont été produites ces dernières années sur l'enneigement et le recul du trait de côte, mais celles-ci manquent encore pour d'autres secteurs comme la croisière, le patrimoine...).

10a. Mobilité

- Principal émetteur de CO₂ en France et en Occitanie, le secteur des transports joue un rôle considérable dans le changement climatique. L'essentiel de ces émissions sont liées aux transports routiers (95 %) alors que le transport aérien représente un faible volume mais un bilan par passager transporté encore plus lourd que la conduite autosoliste.
- Parvenir à réduire ces déplacements motorisés ne peut alors se faire que dans le cadre d'une réduction des besoins de déplacements (démobilité, cohérence urbanisme-transports) ou d'un report modal massif vers des modes à l'empreinte carbone faible voire nulle tels que le train, les transports collectifs ou les modes actifs que sont la marche et le vélo. Miser sur les solutions technologiques au sein des secteurs automobiles et aériens présente de très nombreuses incertitudes et des risques d'effets rebonds importants.
- La mise en œuvre de solutions alternatives nécessite une coordination accrue entre les acteurs de la mobilité et des transports autour de mesures qui relèvent aussi bien d'enjeux liés aux infrastructures, à l'exploitation, à la tarification qu'à la sensibilisation des usagers afin de penser des solutions de déplacements qui prennent en charge la diversité des déplacements du premier au dernier kilomètre.

10b. Énergie

- Il existe un double intérêt au développement de la méthanisation avec la production d'énergie renouvelable et la production d'un digestat ayant une valeur agronomique et environnementale. Le champ d'étude associé à l'influence de l'adoption de la méthanisation sur le fonctionnement des agroécosystèmes à différentes échelles, depuis le sol jusqu'aux territoires en passant par l'exploitation agricole, est large et reste à explorer.
- L'essor des énergies citoyennes est particulièrement important en Occitanie. Ces projets innovants sont caractérisés par une gouvernance locale et visent l'intérêt du territoire et l'autonomie énergétique. Grâce à un appui des acteurs institutionnels (Région, ADEME), on dénombre en 2021, 26 projets en fonctionnement, 33 en développement, et 19 en phase d'émergence.

• L'hydroélectricité est la première source d'énergie renouvelable en Occitanie mais fait face à plusieurs contraintes dans un contexte de changements climatiques, et questionne le niveau et la capacité de contribution future de l'Occitanie à la production d'hydroélectricité. L'effet attendu du changement climatique sur le remplissage des réservoirs serait en premier lieu la réduction et l'avancement de l'apport de la fonte nivale. La baisse des apports aux réservoirs et donc du potentiel de production semble quasi certaine. A cette réduction, s'ajoutent pour les producteurs d'hydroélectricité la nécessité de respecter les contraintes exprimées à l'aval des (débits écologiques et volume contractuel dédié à d'autres besoins), induisant moins de flexibilité pour le déstockage de l'eau en période hivernale en réponse à la demande d'énergie. Dans ces conditions, l'hydroélectricité produite dans les Pyrénées ne pourra pas contribuer au réseau électrique français comme par le passé. Ces évolutions interrogent donc la contribution de l'hydroélectricité à la production d'électricité dans les prochaines décennies et la vraisemblance de certains scénarios de mix énergétique.

11. Gouvernance

• La gouvernance du changement climatique en Occitanie découle de politiques et de dispositifs impulsés à une échelle d'abord internationale et nationale, puis relayés d'en haut sur les territoires par l'organisation d'un transfert de compétences comme d'une répartition des tâches à mettre en œuvre. Pour autant, les collectivités territoriales françaises ont su se montrer proactives face à l'enjeu climatique et parmi elles, la Région Occitanie occupe une position de leadership par l'ancienneté de sa mobilisation sur l'enjeu du développement durable comme de sa conversion forte à la lutte contre les dérèglements climatiques.

• L'enjeu climatique appelle des formes élargies et horizontales de gouvernance, qu'il s'agisse de faire travailler ensemble les acteurs de l'action publique (notamment au-delà du périmètre des autorités publiques), de dépasser les cloisonnements sectoriels, d'articuler les échelles de gouvernement ou de favoriser des types d'instruments incitatifs fondés sur les démarches de collaboration et d'innovation.

• Les acteurs scientifiques composent d'ailleurs un pôle incontournable dans la gouvernance climatique au sens où ils permettent tant d'évaluer et de prévoir l'ampleur des changements que de calibrer les politiques qui visent à les contenir. De ce point de vue, l'Occitanie peut compter sur un riche écosystème scientifique qu'il faut toutefois davantage connecter aux acteurs de la décision. Une remarque identique peut être formulée au sujet des acteurs économiques qui devraient être mobilisés de manière plus transversale dans la gouvernance climatique.

• La gouvernance climatique occitane rencontre toujours des freins, liés aux modes de financement des actions, aux tensions qui peuvent être produites par la nécessaire coordination d'usages potentiellement conflictuels, à la politisation de l'enjeu climatique, au désajustement des échelles de gouvernement, à la résistance de certains groupes sociaux ou aux limites intrinsèques de l'exercice de modélisation du devenir des territoires et des enjeux.

12. Enjeux psychosociologiques

• Il est essentiel de communiquer autrement que par le simple fait de donner de l'information pertinente : il faut rapprocher cette information des individus (vulgariser) et les rendre acteurs dans le processus de communication (communication engageante, science participative, recherche action) en les impliquant toujours davantage. La recherche et les pratiques communicationnelles sont à envisager dans une perspective de co-construction mêlant savoirs experts et savoirs ordinaires.

• Les formes de communication choisies doivent être réfléchies sous un angle éthique, en perspective avec la question de l'articulation entre les buts et les moyens (la fin justifie-t-elle les moyens ?).

• Un travail doit être réalisé sur le développement d'une identité environnementale collective pour interroger une approche communicationnelle durable face aux approches conduisant à la modification des comportements (nudges et communication engageante), qui sont des approches efficaces mais souvent dépendantes des dispositifs mis en place. L'enjeu de la construction d'une identité environnementale collective est d'aboutir à la pérennisation de la modification des comportements, au lieu de modifications parfois éphémères.



CHAPITRE

0

**INTRODUCTION
GÉNÉRALE****Rédaction :**

Guillaume SIMONET (*RECO*)

Relecture :

Sylvain BARONE (*INRAE - G-EAU*), Julie FABRE (*consultante*), Julia HIDALGO (*CNRS - LISST*), Virginie HUGUES (*consultante*), David SALAS Y MELIA (*Météo-France/CNRS - CNRM*)

Le RECO, une organisation frontière sur les changements climatiques

Face à l'accélération des changements climatiques, les organisations territoriales publiques, privées ou associatives sont en attente de résultats scientifiques pour arbitrer leurs choix en matière d'aménagement, d'évolutions des pratiques ou de mise à jour de programmes de sensibilisation. Du côté des scientifiques, il s'agit d'arriver à rendre intelligibles les résultats de leurs travaux, sans tomber dans une simplification trop caricaturale. Dès lors, l'urgence de prendre en compte aussi bien l'accélération des changements climatiques que la complexité de ses interactions avec d'autres problématiques toutes aussi contraignantes nécessite un transfert des connaissances existantes vers les pouvoirs décisionnels, basé sur des langages et des modes de pensées compréhensibles par tous.

Le concept d'« organisations frontières »

Le concept d'organisation frontière est issu de travaux en sciences humaines et sociales. Il désigne des organisations intermédiaires mises en place pour réunir des acteurs de différentes communautés. Cette forme particulière d'organisation mise sur une volonté commune de se rassembler tout en permettant de conserver son identité, d'exposer ses enjeux et d'être capables d'arriver à trouver des intérêts convergents afin de défendre un objectif commun. Les organisations frontières peuvent prendre la forme de réseaux, d'institutions ou d'organisations sociales qui opèrent une hybridation et une circulation d'informations entre plusieurs communautés, généralement entre la sphère scientifique et décisionnelle. Concernant les changements climatiques, le Groupe intergouvernemental des experts sur l'évolution du climat (GIEC) en constitue l'exemple type.

Plusieurs travaux montrent que les organisations frontières favorisent la coproduction de connaissances, mettent en interaction différentes sphères sociales et rendent possible une action coordonnée (Cash et al., 2003). Trois caractéristiques les distinguent :

- 1) elles impliquent des rôles spécialisés au sein de l'organisation ;
- 2) elles ont des responsabilités claires vis-à-vis des arènes sociales situées de part et d'autre des frontières ;
- 3) elles favorisent des espaces de dialogue dans lesquels l'information peut être coproduite par les acteurs de différents bords.

Parmi les caractéristiques principales associées à une organisation frontière, on retrouve également son indépendance d'action et une communication active, itérative et inclusive entre experts. Cette dernière est cruciale pour mobiliser des connaissances scientifiques considérées comme essentielles, crédible et légitimes.

Lier ces connaissances à l'action nécessite également l'ouverture de canaux de communication entre les experts, les thématiques et les décideurs, ce qui requiert que les participants puissent se comprendre au-delà des jargons, codes ou langages de chaque sphère mobilisée. Toutefois, si un effort de traduction peut faciliter la circulation de l'information entre les experts et les décideurs, les compromis restent fondamentaux.

Tour d'horizon d'organisations frontières sur les changements climatiques

Pionnière, l'United Kingdom Climate Impacts Programme (UKCIP) fut établie en 1997 à l'Environmental Change Institute de l'Université d'Oxford afin de développer les connaissances sur les impacts des changements climatiques au Royaume-Uni et de les échanger avec les décideurs en vue d'améliorer l'adaptation du pays en réunissant scientifiques et praticiens.

Ouranos est un consortium sur la climatologie régionale et l'adaptation aux changements climatiques installé à Montréal (Canada) depuis 2001. Il fut mis en place dans la foulée d'événements climatiques extrêmes majeurs (inondations du Saguenay en 1996, crise du verglas en 1998). Né d'une vision commune entre le Gouvernement du Québec, Hydro-Québec et Environnement Canada, Ouranos permet à des experts et scientifiques de différents horizons et intérêts de travailler en réseau afin de développer des applications et informations qui pourront être plus facilement opérationnalisées par des acteurs territoriaux impliqués à toutes les étapes.

De nombreuses organisations frontières sur le climat, ou « groupes régionaux d'experts sur le climat (GREC) » (préférés ici à l'expression « GIEC local ») sont en place ou en émergence en France ([carte](#)). Parmi celles-ci, notons les deux voisins est-ouest du RECO :

- [AcclimaTerra](#), qui a fait suite à un groupe transdisciplinaire créé en 2011 à la demande du Conseil Régional d'Aquitaine pour mener une mission d'expertise sur les impacts climatiques en Aquitaine. Présidé par Hervé Le Treut, AcclimaTerra répond au souhait du Conseil Régional de Nouvelle-Aquitaine de doter le territoire régional d'un groupe d'experts scientifiques permanent, indépendant, capable d'apporter aux acteurs du territoire les connaissances nécessaires à leurs stratégies d'adaptation aux changements climatiques.

- le groupe régional d'experts sur le climat en région Sud Provence-Alpes-Côte d'Azur ([GREC-Sud](#)) créé en 2015, dont la mission générale est de sensibiliser les publics et transférer les connaissances scientifiques sur le changement climatique vers les acteurs du territoire afin d'informer les gestionnaires dans l'optique d'une meilleure compréhension et d'une prise en compte des résultats scientifiques dans les politiques publiques.

Missions et réalisations du RECO

Dans la lignée de ces émergences, le RECO fut lancé en novembre 2017 avant de devenir une association loi 1901 en mars 2019, puis d'être coporté en tant que plateforme d'expertise sur les changements climatiques par les deux Maisons des sciences de l'homme d'Occitanie (MSH-Sud de Montpellier et MSH de Toulouse) en 2021. Son objectif principal est de rapprocher les connaissances, les initiatives et les réseaux portant sur les changements climatiques à l'échelle de la région Occitanie dans le but d'éclairer les décisions en matière de stratégies et d'actions locales d'adaptation. Pour ce faire, il s'appuie sur trois missions : 1) accompagner le transfert des connaissances ; 2) assurer un rôle d'interface et 3) demeurer un appui à la décision locale.

Depuis ses débuts, plusieurs réalisations ont marqué le cheminement progressif du RECO, notamment :

- la création de l'outil en ligne de Cartographie de l'action climatique en Occitanie (CACO) ;
- l'élaboration conjointe avec le GREC-Sud du Cahier Territorial Cévennes et Changements climatiques

suite à la commande du Parc national des Cévennes pour leurs 50 ans ;

- la co-organisation d'un cycle de webinaires abordant différents sujets d'intérêts communs entre la France et le Québec en matière d'adaptation au changement climatique avec Ouranos et Futurs-Act ;
- mise en place d'une première version d'un annuaire des scientifiques et des acteurs territoriaux d'Occitanie travaillant sur les changements climatiques ;
- le partenariat avec des événements locaux (La Mer Monte, du Parc naturel régional de la Narbonnaise, Carrefour Climat, du Parc naturel régional des Pyrénées Ariégeoises) ;
- l'organisation d'événements comme la Journée de rencontres scientifiques sur les changements climatiques en Occitanie ;
- ou encore la participation à des comités (Parc national des Pyrénées, Parc naturel régional de la Narbonnaise).

Le CROCC_2021 constitue ainsi une réalisation de plus dans ce cheminement.

L'adaptation aux changements climatiques : éléments de cadrage

La notion d'adaptation a été définie dans le 2^e rapport du GIEC (1995) comme l'ensemble des actions qui devraient agir sur les conséquences des changements climatiques, par opposition à ou en complément de l'atténuation, qui doit agir sur leurs causes, instaurant dès lors une dichotomie « atténuation - adaptation ». Cette présentation terminologique reflète le contexte de l'époque considérant les changements climatiques comme un problème avant tout technique. Ainsi, dans la lignée des succès diplomatiques sur la réduction des substances qui altèrent la couche d'ozone (Protocole de Montréal adopté en 1985) et celle sur les émissions transfrontières d'oxydes d'azote (Protocole de Sofia, adopté en 1988), le raisonnement fut posé en ces termes : « il suffit de réduire les émissions de GES » pour résoudre une problématique climatique encore faiblement comprise et acceptée à l'époque. S'en suivent le Protocole de Kyoto (adopté en 1997) puis l'Accord de Paris (adopté en 2015), avec toutes les limites qu'on leur connaît en termes d'efficacité sur la réduction des émissions de GES.

Très vite, la mise en pratique à l'échelle locale de cette dichotomie « atténuation – adaptation » s'interpréta de multiples manières au point que sa mise en œuvre reste floue : est-ce que « développer la végétalisation urbaine » ou « lutter contre la précarité énergétique » sont des actions d'adaptation, comme le mettent en avant certaines collectivités ou bien, comme le proposent d'autres collectivités, ce sont des actions qui rentrent dans un volet économique, social, énergétique, de santé, de protection de la biodiversité ou encore d'autonomie alimentaire ? (Simonet et Leseur, 2019).

Ainsi, la phase d'opérationnalisation de l'adaptation aux

changements climatiques se heurte à un triple décalage entre :

- l'évolution du cadre théorique scientifique, qui estime souvent que l'adaptation s'anticipe et se prépare (**voir encadré 0.A**) ;
- les injonctions et les discours prescriptifs des pouvoirs publics, lesquels ont massivement recours au concept de résilience pour donner corps à l'adaptation au détriment parfois d'une adaptation plus sociétale fondée sur les principes de solidarité et d'éthique (Quenault, 2013) ;
- les réalités de terrain qui peuvent amener les acteurs territoriaux à concrétiser l'adaptation par des actions aussi bien techniques, que touchant à l'aménagement ou à des programmes de sensibilisation afin de les faire converger avec des enjeux prioritaires locaux (Simonet, 2015a).

Dès lors, force est de constater qu'une action peut relever de l'adaptation selon les enjeux, l'interprétation et les intérêts propres à chaque acteur, révélant l'existence d'une pluralité d'« adaptations silencieuses », qui, bien que non intitulées comme actions d'adaptation en tant que telles, participent pourtant à faire face aux enjeux climatiques de manière directe ou indirecte (Simonet, 2017).

Renouveler les bases de la réflexion sur l'adaptation

Ainsi donc, alors que l'adaptation aux changements climatiques est encore largement définie selon le schéma dichotomique de 1995 et que les contextes socioécono-

miques, environnementaux et scientifiques ont évolué, plusieurs points peuvent être gardés en tête :

- **considérer les changements climatiques comme une problématique avant tout sociétale** : les émissions humaines des GES responsables de ces changements étant la conséquence directe des choix de société, cela nécessite une transformation du récit sociétal présenté depuis plusieurs décennies ;
- garder à l'esprit que les changements climatiques s'inscrivent dans une problématique de changements globaux et sont le reflet, à l'échelle du climat, du défi posé par la trajectoire socioéconomique basée sur les ressources fossiles. **Aucune action climatique mise en place, que ce soit pour réduire les GES ou se protéger des impacts, n'a de sens si elle aggrave d'autres problématiques tout aussi vitales pour notre civilisation** (biodiversité, santé, surexploitation des ressources) ;
- accepter que **nous vivons un moment de l'histoire de l'humanité et de la planète qui n'a jamais été expérimenté auparavant**, afin d'ouvrir des options de trajectoires qui puissent passer par des expérimentations de toutes sortes, comme le résume l'Institut international pour le développement durable (IISD) : « *l'absence de cadrages conceptuels solides de l'adaptation est une opportunité pour que les acteurs locaux puissent expérimenter et apprendre sur ce qui a le plus de sens dans leur propre contexte spécifique* ».

Au niveau des réponses à apporter face aux changements climatiques, plusieurs points pourraient aider à mieux cerner ce que le défi de l'adaptation représente en termes opérationnels :

- le fait que l'adaptation aux changements climatiques constitue une démarche sociale dynamique qui dépend de notre capacité d'agir collectivement, en

partant de l'échelle locale, en vue d'élaborer de nouveaux récits qui prennent en compte les contextes de chacun ;

- développer l'intercognitivité, c'est-à-dire, la compréhension mutuelle des enjeux, des intérêts et des réalités de chacune des parties prenantes du territoire ou des activités considérés (UrbaLyon, 2011). Ceci permet non seulement d'éviter de raisonner en silos mais également de mieux cerner le sens des actions de chacun, à partir notamment du décloisonnement des savoirs de toutes sortes (académiques, expertises, expérientiels, intuitifs). En ce sens, l'intercognitivité se distingue et complète l'interdisciplinarité par le fait que les actions mises en oeuvre par les parties prenantes d'un territoire ou d'une entreprise ne peuvent pas être comprises uniquement à travers un filtre disciplinaire théorique, mais également par une compréhension des logiques propres (savoirs, perceptions, langages) à leurs contextes personnels, culturels ou corporatifs qu'elles mobilisent en amont de leurs actions ;
- engager une démarche d'adaptation, c'est d'abord poser un cadre d'analyse opportun qui interroge la viabilité du système considéré (territoire, activités, organisations), non seulement au regard des enjeux climatiques mais également à la lumière des autres problématiques locales. Cette approche décloisonnée est également une opportunité pour repenser nos liens avec le monde vivant non humain et pour contextualiser les actions possibles afin de rejoindre les intérêts et les logiques d'actions des différentes parties prenantes concernées ;
- consolider l'idée dans le domaine de la recherche que l'adaptation aux changements climatiques puisse être un carrefour interdisciplinaire, d'où peut émerger une cohésion scientifique qui favorise les dialogues et les décloisonnements entre expertises (Patt, 2013).

Encadré 0.A. L'évolution des définitions de l'adaptation dans les rapports du GIEC

Les réflexions scientifiques sur l'adaptation ont évolué depuis le 2^e rapport du GIEC de 1995, notamment grâce aux retours d'expériences de terrain et à l'entrée en scène des sciences humaines et sociales. De ce fait, les définitions de l'adaptation ont elles aussi évolué, comme en témoigne le glossaire du tome 2 du rapport du GIEC de 2014 qui présente une douzaine de définitions qui contiennent le terme « adaptation », deux définitions pour le terme « atténuation » et plusieurs définitions pour la « gestion des catastrophes », la « gestion des risques » et la « gestion des risques de catastrophe ». Parmi les nouvelles définitions, deux attirent l'attention : l'adaptation-incrémentale (qualifiées de « mesures ayant pour objectif principal le maintien de la nature et de l'intégrité d'un système ou d'un processus à une échelle donnée ») et l'adaptation-transformationnelle (décrites comme des mesures qui « changent les éléments fondamentaux d'un système en réponse au climat et à ses effets »). Chacune de ces formes d'adaptation a ses caractéristiques et se complètent l'une et l'autre. Toutefois, si l'adaptation-incrémentale focalise plutôt sur des réponses immédiates et à la marge dans le but prioritaire de protéger, l'adaptation-transformationnelle vise davantage une transformation notable, voire profonde, des territoires ou activités. Les deux réponses ont donc des manières d'opérer différentes : réponses au coup par coup (par exemple par l'intermédiaire de l'expertise) pour l'une, processus social et décloisonnement pour la seconde. Malgré cette apparence duale incrémentale – transformationnelle, cette terminologie permet de présenter l'adaptation comme un schéma d'évolution graduelle fait de nuances qui intègre tout aussi bien l'idée de se protéger que de se réorganiser pour faire face aux multiples défis aussi bien climatiques, énergétiques que globaux (Simonet, 2015b).

Structure du CROCC_2021

Public visé et architecture générale

Ce premier Cahier régional Occitanie sur les changements climatiques (CROCC_2021) a pour objectif principal de dresser un état des connaissances des enjeux issus de l'évolution climatique et globale qui altère d'ores et déjà de multiples activités, populations et territoires de la région (**figure 0.1**). Même si le CROCC_2021 est accessible à tout public, son élaboration a été pensée pour que les décideurs publics, privés et associatifs ré-

gionaux puissent en intégrer des éléments dans leurs politiques ou plans d'actions.

Les auteurs du document espèrent pouvoir ainsi participer à l'accélération de la mise en place de stratégies d'adaptation et d'actions de réorganisations face à cette évolution climatique et globale. En termes d'architecture générale, il nous est apparu pertinent de nous inspirer de la nouvelle façon d'envisager les Objectifs de Développement Durable (ODD) afin de montrer comment ils sont tous liés (**figure 0.2**).

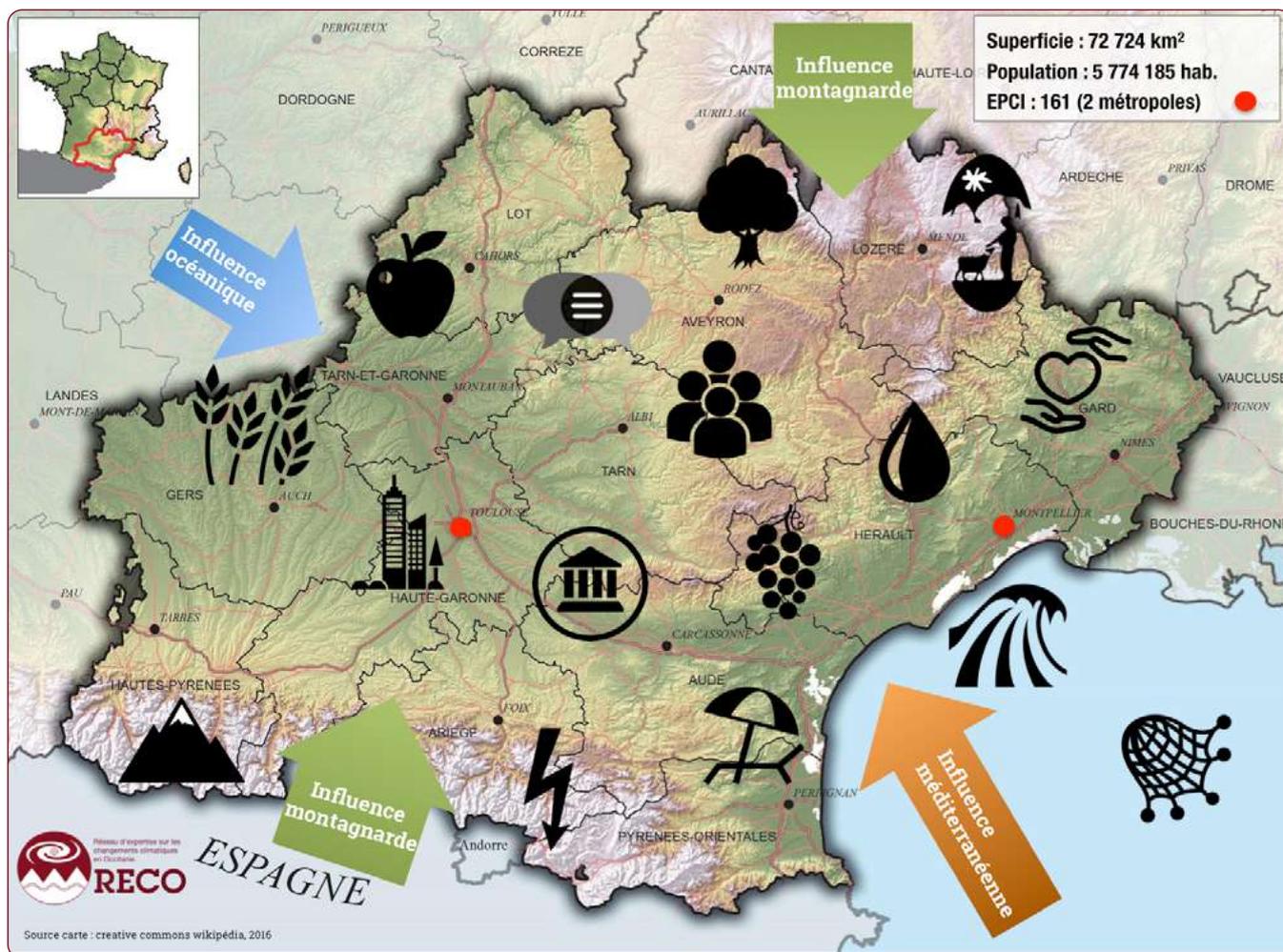


Figure 0.1. Carte non exhaustive d'enjeux climatiques identifiés en Occitanie pour l'élaboration du CROCC_2021.
(Source : RECO, 2021)

Construit dans un esprit similaire, le CROCC_2021 aborde les enjeux selon trois parties. La première englobe les enjeux de l'**écosphère**, soit l'ensemble des sphères de la planète (hydrosphère, atmosphère, cryosphère, lithosphère et biosphère). Elle réunit les chapitres traitant du climat régional, de la biodiversité et de l'eau. En incluant la santé dans cette partie, nous nous inscrivons clairement dans une perspective écocentrique selon laquelle l'humain fait partie du vivant.

La deuxième partie aborde les enjeux en termes de **milieux géographiques**, dont certains constituent d'importantes spécificités de l'Occitanie. On y retrouve les chapitres traitant des milieux urbanisés, des milieux lit-

toraux et des milieux montagnards.

La troisième partie traite des enjeux relatifs aux **activités** qui caractérisent plusieurs dynamiques sociales et économiques de la région. Y sont inclus les chapitres abordant les agrosystèmes, le tourisme, la mobilité et l'énergie, dont les interdépendances évoluent au gré des évolutions de chacun de ces secteurs. Nous avons choisi de terminer le CROCC_2021 sur les aspects de gouvernance et d'enjeux psychosociologiques, afin de rappeler l'importance des institutions et des attitudes (si peu prise en considération dans les projets de recherche) sur nos choix passés et ceux qui détermineront notre futur collectif régional (**figure 0.3**).

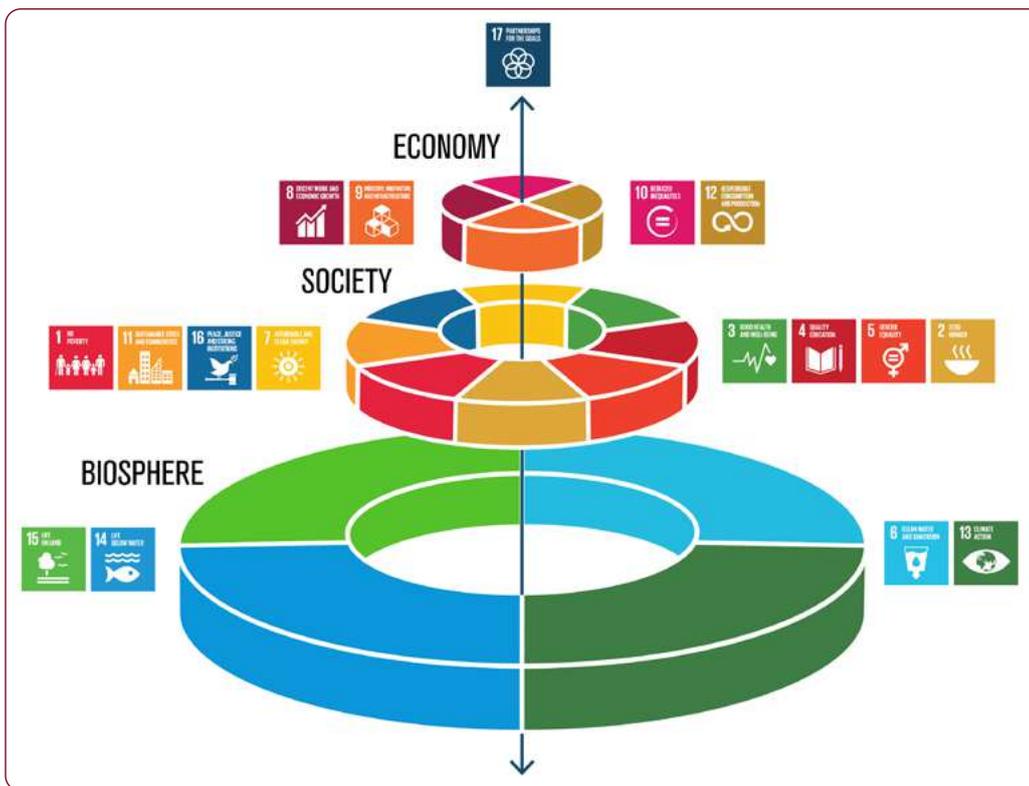


Figure 0.2. Nouvelle manière d'agencer les ODD. Travail réalisé par J. Rockström et P. Sukhdev à partir d'une infographie développée par C. Folke du Stockholm Environment Institute, (Source : Azote Images pour Stockholm Resilience Centre, tiré du rapport Living Planet de WWF, 2018)



Figure 0.3. Structure générale du CROCC_2021 : les trois parties et les 12 chapitres. (Source : RECO, 2021)

Un volet scientifique et un volet territorial

Le **volet scientifique** propose un bilan des travaux de recherche pour les 12 enjeux identifiés qui constituent autant de chapitres coordonnés chacun par un duo d'experts. L'ensemble des duos de coordinations de chapitres-enjeux forme le **Comité scientifique** (CS) qui a eu en charge d'arbitrer les sujets transversaux et d'élaborer les messages clés à mettre en avant dans le résumé pour décideurs. Chaque chapitre-enjeu est rédigé par des scientifiques sollicités ou volontaires au moyen de courtes contributions au style le plus précis, concis et rigoureux possible.

Au total, plus de 200 contributeurs, dont la grande majorité sont des scientifiques d'Occitanie, ont rédigé le CROCC_2021. Cette mobilisation, qui implique plus d'une centaine d'organisations scientifiques, montre le dynamisme et l'engagement de la communauté de recherche régionale sur la question climatique.

Le **volet territorial** donne la parole aux acteurs territoriaux d'Occitanie (collectivités, entreprises et associations) afin de mettre en lumière des actions mises en place à l'échelle locale, à travers un panel d'exemples présentés dans de courts encadrés disséminés à travers l'ensemble du document. Pour chaque action, une fiche détaillée est disponible sur l'outil en ligne de Cartographie de l'action climatique en Occitanie ([CACO](#)).

Un **Comité territorial** (CT), composé de quatre représentants institutionnels d'Occitanie, a été créé afin de sélectionner les exemples d'action selon plusieurs critères. Outre la pertinence des actions, une attention particulière a été portée sur la représentativité en termes géographique (au moins une action par département), thématique et de type d'acteurs, ainsi que sur la reproductibilité de l'action dans d'autres contextes. Au total, le CROCC_2021 présente **24 actions** qui sont autant d'exemples d'innovations, d'engagements ou d'évolutions dans les pratiques.

Précisions sur le contenu

Nous estimons important de décroisonner les enjeux pour en souligner les interrelations. À ce titre, la publication conjointe du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et de la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) parue en 2021 (**voir annexe 2**) est à nos yeux un signal important. Nous avons souhaité y faire référence en sollicitant l'expertise de l'Agence régionale de la biodiversité en Occitanie (ARB Occitanie) pour participer à la rédaction du chapitre Biodiversité et ainsi mettre un accent sur cette problématique au même titre que la question climatique. En effet, bien que la focale du RECO se porte sur les changements climatiques, nous ne cesserons de souligner dans nos actions que la dimension climatique n'est qu'une composante de l'évolution globale inédite que la planète subit depuis le début de l'exploitation massive des ressources fossiles. Une réduction même drastique des émissions de gaz à effet de serre ne saura mettre fin à l'érosion de la biodiversité et la destruction des habitats, à la propagation des multiples pollutions et leurs impacts sanitaires ou, aux comportements de consommation massive et à toutes leurs conséquences sociales.

Enfin, l'énergie déployée pour ce travail est essentiellement motivée par la forte conviction du caractère urgent d'accélérer la mise en place d'actions à l'échelle locale pour faire face aux enjeux climatiques et globaux. Ce travail témoigne également de la certitude du bien-fondé de l'action d'une organisation frontrière telle qu'un groupe régional d'experts sur le climat. Au prix d'un effort soutenu et sincère, l'ensemble de l'équipe d'animation du RECO a ainsi fait de son mieux pour mener à bien la dynamique de coordination et d'élaboration du CROCC_2021, lequel n'est qu'une étape de plus dans l'indispensable effort à entreprendre en vue de la transformation de nos comportements, activités et territoires d'Occitanie (**figure 0.4**).

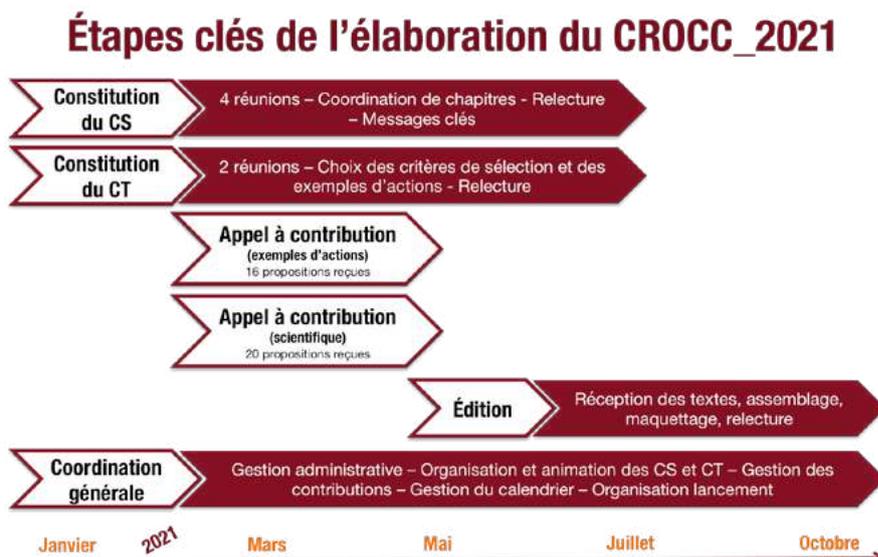


Figure 0.4. Étapes principales de la démarche d'élaboration du CROCC_2021. (Source : RECO, 2021)

Encadré 0.B. Le CROCC_2021, un complément d'informations

Bien que le CROCC_2021 soit le premier état des lieux scientifique sur les changements climatiques en Occitanie, ses informations complètent d'autres rapports en lien avec l'évolution climatique et globale sur ses territoires. Parmi ceux-ci, signalons de manière non-exhaustive :

- le 1^{er} [rapport](#) d'évaluation sur la Méditerranée (MAR1) - Changement climatique et environnemental dans le bassin méditerranéen – Situation actuelle et risques pour le futur ;
- le [rapport](#) sur la recherche en Écologie Environnementale en Occitanie : Biodiversité et territoires dans un contexte de changements globaux (2020) ;
- le [rapport](#) de la Mission d'information et d'évaluation sur le suivi et évaluation du changement climatique en Région Occitanie / Pyrénées Méditerranée (2020) ;
- le [rapport](#) Sciences marines et littorales en Occitanie des dossiers d'Agropolis international (2019) ;
- les documents disponibles sur le site Eau-grand Sud-Ouest, parmi lesquels le [plan](#) d'adaptation au changement climatique du bassin Adour-Garonne (2018) ;
- le [document](#) Changement climatique : impacts et adaptations des dossiers d'Agropolis international (2015), lequel présente les acteurs de la recherche basés dans l'ex-région Languedoc-Roussillon qui se mobilisent pour répondre aux enjeux liés à l'étude des impacts et des adaptations au changement climatique.



CROCC_2021

PARTIE
ECOSPHERE





CHAPITRE

1

CLIMAT RÉGIONAL

Coordination : David SALAS Y MELIA et Jean-Michel SOUBEYROUX

Rédaction : David SALAS Y MELIA, Jean-Michel SOUBEYROUX, Cécile CAILLAUD, Brigitte DUBUISSON, Pierre NABAT, Aurélien RIBES, Yoann ROBIN, Florence SEVAULT, Samuel SOMOT.

Relecture : Samuel MORIN, Serge PLANTON.

Le climat actuel de l'Occitanie

La région Occitanie connaît une mosaïque de climats modulés par les influences maritimes (océan Atlantique et mer Méditerranée), la présence de massifs montagneux (Pyrénées et Massif central) et la distribution de grandes vallées fluviales (Garonne et Aude notamment) orientant les écoulements atmosphériques, qui se manifestent notamment par le vent d'Autan, la Tramontane ou le Mistral.

Ces différents climats (méditerranéen, océanique dégradé ou montagnard) se distinguent notamment par les cumuls annuels et saisonniers de précipitation que l'on y rencontre. Le cumul annuel des précipitations moyen sur la période 1981-2010¹ est de moins de 600 mm (1 mm de précipitations représentant 1 litre d'eau par m²) sur le littoral languedocien, de l'ordre de 1500 mm sur les crêtes des Pyrénées et l'Aubrac et dépasse 2000 mm

sur les Cévennes (Massif du Mt Aigoual et du Mt Lozère) (**figure 1.1**).

Le cumul annuel moyen sur la région Occitanie pour la période 1991-2020 est de l'ordre de 950 mm, mais varie fortement d'une année à l'autre. Par exemple, la valeur de ce cumul annuel était de 696 mm en 1967, et de 1313 mm en 1996 (**figure 1.2**). Dans le climat méditerranéen, les précipitations se produisent majoritairement aux intersaisons, au printemps et surtout en automne tandis que les pluies sont régulièrement réparties sur l'année en climat océanique dégradé. En montagne, les pluies orageuses d'été prédominent dans le cumul annuel.

¹ Les cumuls moyens de précipitations sont estimés ici sur une période de 30 ans, car ils peuvent varier significativement à la hausse ou à la baisse d'une décennie à l'autre.

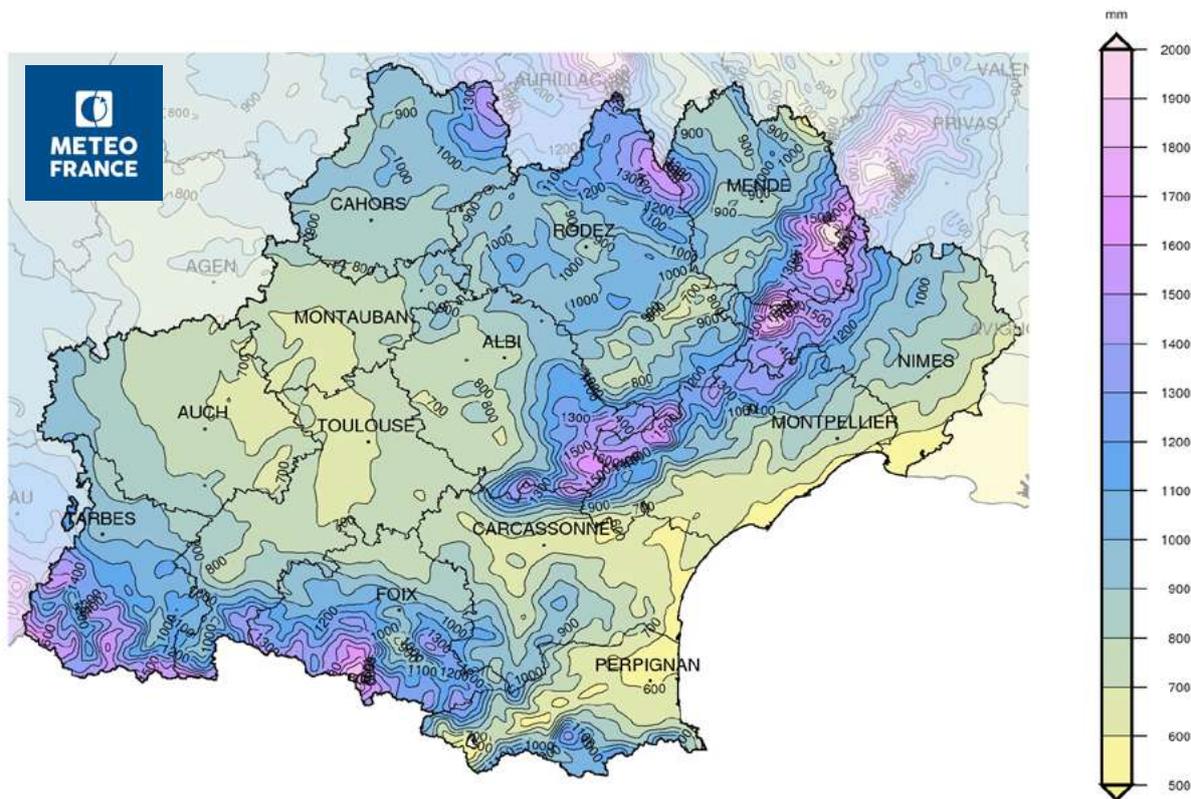


Figure 1.1. Cumul annuel (en mm) des précipitations sur l'Occitanie en moyenne sur 1981-2010. (Source : Météo-France, pour le CROCC_2021)

L'une des autres particularités du climat de l'Occitanie concerne les précipitations intenses dans les régions proches de la Méditerranée. Ces phénomènes se produisent principalement en automne et peuvent conduire à l'équivalent de plusieurs mois de pluie en seulement quelques heures ou quelques jours. Ils sont la cause de crues soudaines et de glissements de terrain et peuvent être à l'origine d'importantes pertes humaines et matérielles.

Ils sont appelés épisodes cévenols lorsqu'ils sont directement liés au soulèvement de masses d'air en présence d'un relief ou plus généralement épisodes méditerranéens. Les pluies intenses surviennent quand de l'air chaud et chargé en humidité provenant de la mer Méditerranée est surmonté par des masses d'air froid en altitude.

Ce conflit de masses d'air, source d'instabilité, est à l'origine de mouvements verticaux intenses : l'air chaud et humide présent près de la surface s'élève et se refroidit, entraînant la condensation de la grande quantité de vapeur d'eau qu'il contient en nuages d'orage qui apportent ensuite des pluies intenses.

Les très forts cumuls de précipitations observés lors de ces épisodes s'expliquent le plus souvent par la quasi-immobilité des systèmes orageux, bloqués par la présence de relief, comme celui des Cévennes, ou encore par des lignes de convergence² favorisées par des circulations météorologiques de petite échelle.

² Il s'agit de zones où, près de la surface, le vent converge et contraint l'air à s'élever, ce qui peut engendrer des orages.

Figure 1.2. Évolution du cumul annuel des précipitations (mm) en moyenne sur la région de 1960 à 2020. La courbe en rouge représente la moyenne glissante des données annuelles par périodes de 11 ans.

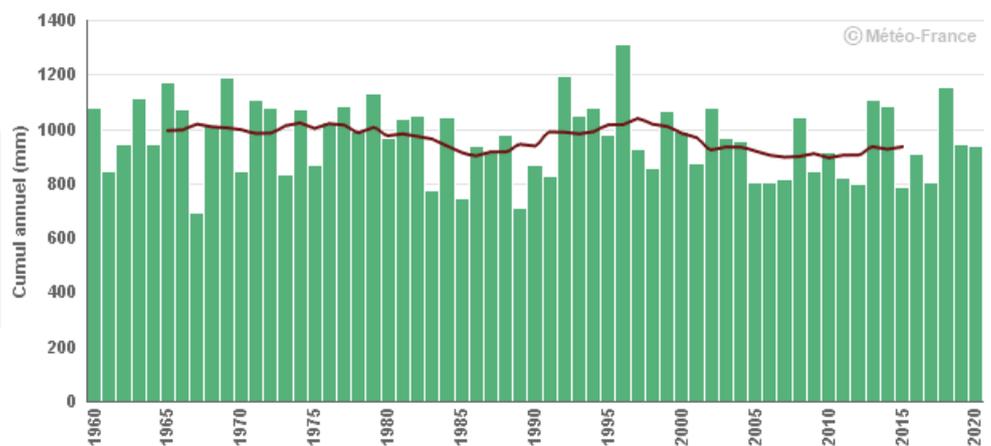
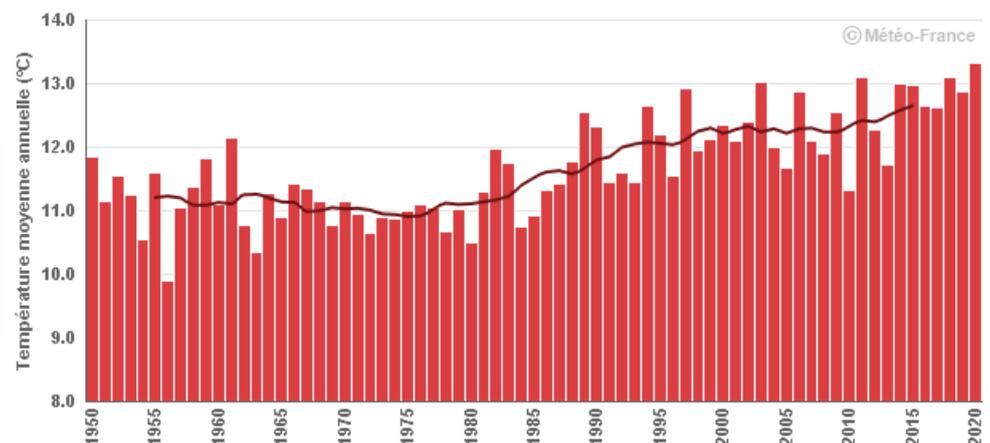


Figure 1.3. Évolution des températures moyennes (°C) annuelles en Occitanie de 1950 à 2020. La courbe en rouge représente la moyenne glissante des données annuelles par périodes de 11 ans.



La température moyenne annuelle de la région Occitanie observée sur la période 2001-2020 est de 12,5 °C, avec des variations d'une année à l'autre pouvant dépasser 1 °C (figure 1.3). Elle se situe autour de 15 °C sur la plaine languedocienne et de 14 °C dans le Midi toulousain. Comme la température moyenne diminue typiquement d'environ 1 °C pour 150 m d'altitude, elle est souvent inférieure à 10 °C sur les hauteurs du Massif central et des Pyrénées dès 800 à 1000 m d'altitude. La

suite de ce chapitre est organisée en sections portant chacune sur l'évolution passée observée d'une variable caractérisant le climat (température, précipitations, etc.), puis sur son évolution future dans plusieurs scénarios.

L'**encadré 1.A** fournit des précisions sur les sources de différents jeux de données et la **table 1.A** rassemble les définitions des principaux indicateurs climatiques utilisés dans le chapitre.

Indicateur	Définition / critère
Nombre de jours de forte chaleur	Nombre de jours avec température maximale quotidienne supérieure à 30 °C
Nombre de jours de vague de chaleur	Nombre de jours d'une séquence d'au moins 5 jours où la température maximale quotidienne est supérieure à la référence climatique d'au moins 5 °C
Seuil des températures maximales les plus chaudes	90 ^e centile des températures maximales quotidiennes (°C) : 10 % des températures maximales sont supérieures à ce seuil, qui dépend du climat du lieu ou de la région considérée
Nombre de nuits tropicales	Nombre de jours avec température minimale quotidienne supérieure à 20 °C
Nombre de jours de gel	Nombre de jours avec température minimale quotidienne inférieure à 0 °C
Nombre de jours de vague de froid	Nombre de jours d'une séquence d'au moins 5 jours où la température minimale quotidienne est inférieure à la référence climatique d'au moins 5 °C
Besoin potentiel de chauffage	Le besoin potentiel de chauffage est estimé sur la base du cumul annuel des écarts négatifs de la température moyenne extérieure au seuil de 17 °C
Besoin potentiel de climatisation	Le besoin potentiel de climatisation est estimé sur la base du cumul annuel des écarts positifs de la température moyenne extérieure au seuil de 18 °C

Table 1.A. Définition (Météo-France) des indicateurs utilisés dans ce chapitre.

Encadré 1.A. Observations et estimations futures du climat

L'ensemble des données caractérisant le climat passé de la région Occitanie sont issues du réseau d'observation de Météo-France. Elles sont rassemblées et traitées par la Direction de la Climatologie et des Services Climatiques de l'établissement, avec correction de l'effet des évolutions de l'implantation des instruments de mesure et des techniques utilisées (homogénéisation). Dans ce chapitre, sauf exception, le climat « actuel » correspond à l'analyse des observations sur la période 2001-2020.

Les changements futurs sont estimés à partir des nouvelles projections climatiques de référence pour la métropole DRIAS 2020 (Soubeyroux et al., 2021), disponibles sur le portail [DRIAS](#). Ce jeu de données s'appuie sur des simulations climatiques produites par plusieurs modèles à haute résolution produites dans le cadre du projet international Euro-CORDEX, et ajustées par une méthode statistique utilisant les observations pour une période de référence passée. Le changement climatique récent et à venir est essentiellement dû aux gaz à effet de serre émis par les activités humaines, tels que le dioxyde de carbone (CO₂) (combustion de ressources fossiles telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel, changements de l'usage des sols, production de ciment), ou encore le méthane (élevage, riziculture, décharges). Pour estimer les évolutions futures du climat, plusieurs scénarios d'émissions sont généralement pris en compte. Les simulations futures retenues dans DRIAS 2020 correspondent à trois des scénarios RCP considérés dans le 5^e rapport du GIEC (GIEC, 2013) :

- RCP2.6 (« forte réduction des émissions ») : les émissions mondiales de CO₂ décroissent au début des années 2020 et sont proches de zéro vers 2070 ;
- RCP4.5 (« scénario médian ») : les émissions de CO₂ atteignent un maximum vers 2040 puis décroissent avant de se stabiliser à la moitié du niveau actuel à partir de 2080 ;
- RCP8.5 (« scénario à fortes émissions ») : les émissions de CO₂ croissent tout au long du XXI^e siècle. En 2100, dans ce scénario elles sont trois fois supérieures au niveau actuel.

Le 6^e rapport d'évaluation du groupe I du GIEC (IPCC, 2021) s'appuie en grande partie sur les nouveaux scénarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) croisant des niveaux d'émissions avec des récits socio-économiques. Par exemple, les scénarios SSP2-4.5 et SSP3-7.0 mentionnés plus loin correspondent respectivement à un monde où les tendances socio-économiques actuelles se poursuivent (émissions proches de celles du scénario RCP4.5), et à un monde fragmenté, avec une croissance économique faible, peu d'efforts pour l'environnement (fortes émissions de gaz à effet de serre).

Dans ce chapitre, sauf exception liée à la disponibilité de certaines données, un horizon « proche » est considéré (2025-2044), sans distinction entre les différents scénarios RCP, ceux-ci étant peu différenciés sur cette période. Les scénarios sont par ailleurs déclinés pour des horizons « milieu de siècle » (2041-2060) et « fin de siècle » (2081-2100) identiques à ceux du 6^e rapport du GIEC.

Évolution des températures

Par rapport à 1901-1920, le réchauffement moyen en Occitanie est estimé à environ 1,8 °C pour 2001-2020 et 2,1 °C pour 2011-2020. Il est donc légèrement supérieur au réchauffement moyen de l'ensemble des continents (1,59 °C) entre 1850-1900 et 2011-2020 estimé par le GIEC dans son 6^e rapport (IPCC, 2021). En Occitanie, l'essentiel du réchauffement s'est produit depuis 1951-1970 (+1,4 °C), et chacune des quatre dernières décennies a été plus chaude que toutes les précédentes depuis 1900.

Depuis les années 1980, le réchauffement moyen est supérieur à 0,4 °C par décennie avec des variations légères d'une décennie à l'autre. Par ailleurs, en moyenne annuelle, les températures diurnes se réchauffent davantage que les températures nocturnes. Le réchauffement récent s'est traduit par une diminution sensible des besoins potentiels de chauffage en Occitanie (de l'ordre de 10 à 15 %) tandis que les besoins potentiels de climatisation ont augmenté d'environ 50 %³, avec des disparités selon le lieu considéré.

En Occitanie, l'année la plus chaude depuis 1950 est 2020, et 9 des 10 années les plus chaudes se sont produites au cours des 20 dernières années (figure 1.3). Le réchauffement depuis 1951-1970 présente des modulations saisonnières avec un maximum en automne (+1,7 °C) et en été (+1,6 °C) et un minimum en hiver (+1,3 °C) et au printemps (+1 °C). La table 1.B illustre l'évolution des températures à travers les changements de températures minimales et maximales des mois de janvier et juillet pour quelques localités d'Occitanie.

Même si à l'échelle d'une région telle que l'Occitanie la variabilité intrinsèque du climat joue un rôle plus fort dans l'évolution de la température qu'à l'échelle mondiale, l'essentiel du réchauffement observé est attribuable aux gaz à effet de serre produits par les activités humaines (IPCC, 2021). Certains composés émis par les activités humaines, notamment les particules soufrées, ont au contraire une contribution refroidissante. À la différence des gaz à effet de serre, qui sont relativement bien mélangés dans l'atmosphère, ces particules sont plus abondantes près des régions où elles sont émises. Leur effet sur le climat est donc différencié d'une région à l'autre.

Dans les prochaines décennies, la température moyenne annuelle continuera à augmenter sur toute la région quel

que soit le scénario considéré. Les informations ci-après sont issues des résultats du rapport DRIAS 2020 réalisé par Météo-France et qui fournit un ensemble de simulations numériques de l'évolution climatique future en France métropolitaine (voir encadré 1.A).

Sur la période 2025-2044, le réchauffement supplémentaire par rapport à 2001-2020 devrait être compris entre 0,5 et 0,9 °C (estimation centrale de 0,7 °C sur l'ensemble de l'Occitanie, soit 2,5 °C de hausse par rapport à 1901-1920). Au-delà, la hausse des températures dépendra d'autant plus du scénario considéré que l'horizon est lointain (table 1.C). Sous le scénario RCP2.6 (fortes réductions des émissions de gaz à effet de serre), la température moyenne en Occitanie devrait se stabiliser à environ 0,5 °C au-dessus de son niveau de 2001-2020 (+2,3 °C par rapport à 1901-1920). En milieu de siècle (2041-2060), le réchauffement est plus prononcé dans les scénarios RCP4.5 (médian) et RCP8.5 (fortes émissions de gaz à effet de serre), respectivement d'environ 1 °C (+2,8 °C par rapport au climat actuel) et 1,4 °C (+3,2 °C par rapport à 1901-1920).

En fin de siècle (2081-2100), les projections indiquent une augmentation de 1,6 °C en RCP4.5 (+3,4 °C par rapport à 1901-1920) et de 3,8 °C en RCP8.5 (+5,6 °C par rapport à 1901-1920). À titre de comparaison, le GIEC a estimé le réchauffement mondial entre 1850-1900 et 2081-2100 à 4,3 °C en RCP8.5 (plage probable 3,2 à 5,4 °C) dans son 5^e rapport (GIEC, 2013), et à 4,4 °C (plage probable 3,3 à 5,7 °C) dans son 6^e rapport (IPCC, 2021) pour un scénario comparable de fortes émissions de gaz à effet de serre (SSP5-8.5).

Comme dans les observations depuis le début du XX^e siècle, les projections indiquent que le réchauffement futur est plus marqué en été et automne qu'en hiver et au printemps. En fin de siècle, dans le cas du scénario RCP8.5, le réchauffement moyen en été par rapport à 2001-2020 est de l'ordre de 4,6 °C, de 4,1 °C en automne, et de 3,4 °C en hiver et au printemps. Par ailleurs, l'amplitude diurne augmente légèrement avec une hausse plus rapide des températures maximales quotidiennes que des températures minimales (+0,1 °C), qui s'accroît en fin de siècle pour atteindre +0,4 °C en RCP8.5.

³ Les estimations fournies ici proviennent de l'application ClimatHD de Météo-France.

	Période 1951-1970		Période 2001-2020	
	Mini/Maxi Janvier	Mini/Maxi Juillet	Mini/Maxi Janvier	Mini/Maxi Juillet
Carcassonne (<i>Aude</i>)	2,0 / 9,0	15,6 / 27,3	3,2 / 10,0	17,4 / 29,2
Gourdon (<i>Lot</i>)	0,7 / 7,5	13,1 / 26,0	2,0 / 8,6	14,6 / 27,8
Mont Aigoual (<i>Gard</i>)	-4,4 / 0,3	9,1 / 15,7	-3,4 / 1,1	10,8 / 18,0
Montpellier (<i>Hérault</i>)	2,2 / 10,9	17,4 / 27,9	3,2 / 12,0	19,6 / 29,7
Perpignan (<i>Pyrénées Orientales</i>)	3,6 / 11,5	18,5 / 28,0	4,8 / 12,8	20,0 / 29,9
Toulouse (<i>Haute-Garonne</i>)	1,8 / 8,7	15,6 / 26,5	3,0 / 9,7	17,3 / 28,5

Table 1.B. Comparaison des températures minimales et maximales de janvier et juillet (°C) pour différentes localités d'Occitanie entre les périodes 1951-1970 et 2001-2020.

Référence 2001-2020	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5
2041-2060	0,5 (0,3 à 1,0)	1,0 (0,6 à 1,3)	1,4 (1,3 à 1,8)
2081-2100	0,5 (0,2 à 0,8)	1,6 (1,3 à 2,0)	3,8 (3,5 à 4,2)

Table 1.C. Réchauffement de la température annuelle moyenne en Occitanie (°C) par rapport à 2001-2020 pour les trois scénarios considérés dans DRIAS 2020 pour le milieu et la fin de siècle. Le réchauffement moyen fourni par l'ensemble des modèles est indiqué, suivi de la plage probable (entre parenthèses). Le réchauffement depuis 1901-1920 peut être obtenu en ajoutant le réchauffement entre 1901-1920 et 2001-2020 (de l'ordre de 1,8 °C).

NB : La plage « probable » (au sens de la terminologie du GIEC) est un intervalle dans lequel une variable estimée a deux chances sur trois de se situer.

L'évolution observée de la température moyenne se retrouve aussi au niveau des extrêmes de température. Les vagues de chaleur se sont multipliées en Occitanie, avec 22 événements identifiés sur 2001-2020 contre seulement 4 sur 1951-1970⁴. Tous scénarios confondus, le nombre de jours de vagues de chaleur (environ 11 par an en moyenne sur 2001-2020) pourrait atteindre 15 à 24 en milieu de siècle. En fin de siècle, les évolutions dépendront fortement du scénario d'émissions puisqu'en RCP8.5, les jours de vague de chaleur (83) pourraient être 8 fois plus fréquents qu'actuellement contre 2 à 3 fois en scénario RCP4.5 (24).

Le nombre de journées de forte chaleur (température maximale supérieure à 30 °C) a doublé à Toulouse entre 1950 et 2020 (figure 1.4). Sur l'ensemble des régions de basse altitude de l'Occitanie, ces événements pourraient être de l'ordre de 30 % plus fréquents à court terme (2025-2044), et 3 à 4 fois plus fréquents en fin de siècle si le scénario RCP8.5 est suivi (facteur 2 en cas de RCP4.5).

Dans le cas du scénario RCP2.6, le nombre de journées de forte chaleur se stabilise à partir du milieu de siècle.

Il a été observé que les températures maximales les plus chaudes ont davantage augmenté depuis 1951-1970 (+1,9 °C) que les températures moyennes (+1,4 °C). Dans le futur, cet écart sera d'autant plus important que le réchauffement moyen est élevé. Par exemple, dans le scénario RCP8.5, les extrêmes chauds de fin de siècle pourraient se situer environ 5 °C au-dessus des niveaux actuels, pour un réchauffement des températures moyennes de l'ordre de 3,8 °C.

Le nombre de nuits tropicales à Nîmes (24 par an en moyenne sur 2001-2020) a été multiplié par 3 depuis les années 1950 (figure 1.5). Ces effets liés à la hausse des températures extrêmes sont accentués dans les grandes agglomérations par les effets de l'îlot de chaleur urbain (voir chapitre-enjeu Milieux urbanisés). A court terme (2025-2044), le nombre de nuits tropicales pourrait atteindre 50 à 80 près du littoral méditerranéen (figure 1.6), soit environ 10 à 15 de plus qu'actuellement, puis augmenter progressivement jusqu'à atteindre 60 à 100 en fin de siècle dans le scénario RCP4.5 et plus de 100 dans le scénario RCP8.5.

⁴ À l'échelle nationale, le nombre de vagues de chaleur est passé de 5 sur 1951-1970 à 26 sur 2001-2020.

Les évolutions devraient être également sensibles sur la plaine toulousaine avec plus de 60 jours en 2081-2100 (soit 4 à 5 fois plus qu'actuellement) en RCP8.5 et de l'ordre de 30 à 40 en RCP4.5 (figure 1.6). En fin de siècle, des nuits tropicales ne sont pas à exclure en montagne même à des altitudes de 2000 m dans le scénario le plus fort. Dans le scénario de fortes réductions des émissions (RCP2.6), le nombre de nuits tropicales devrait se stabiliser sur l'ensemble de la région à partir du milieu de siècle.

Concernant les extrêmes « froids », 21 vagues de froid ont été observées sur 1951-1970 contre 13 sur 2001-2020. Entre 1950 et 2020, le nombre de jours de gel a

significativement diminué sur l'ensemble de la région, de 1 à 3 jours par décennie. Cette tendance devrait se prolonger jusqu'en milieu de siècle, mais devrait être plus marquée sur les zones d'altitude supérieure à 800 m. Vers 2050, les régions littorales devraient connaître moins de 10 jours de gelées par an en moyenne, contre 20 à 30 pour la plupart des régions de faible altitude de Midi-Pyrénées en scénario RCP2.6 et de l'ordre de 10 à 20 en RCP8.5. Dans le scénario RCP8.5, les gelées ne disparaissent pas mais deviennent rares sur le littoral en fin de siècle, avec souvent moins d'un événement par an en moyenne. Les autres régions connaissent généralement moins de 10 jours de gelée par an, sauf dans les zones de montagne situées à plus de 800 m d'altitude.

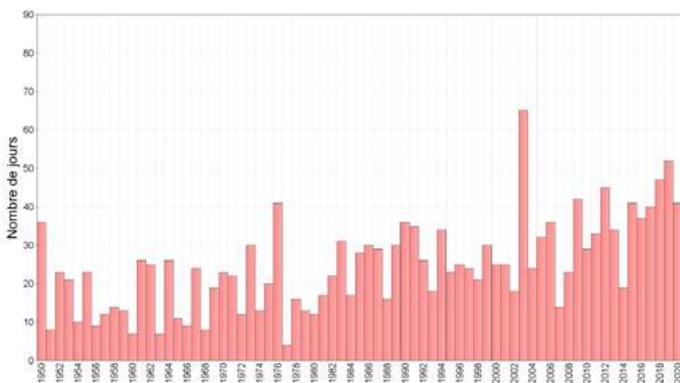


Figure 1.4. Évolution du nombre annuel de jours de forte chaleur à Toulouse de 1950 à 2020

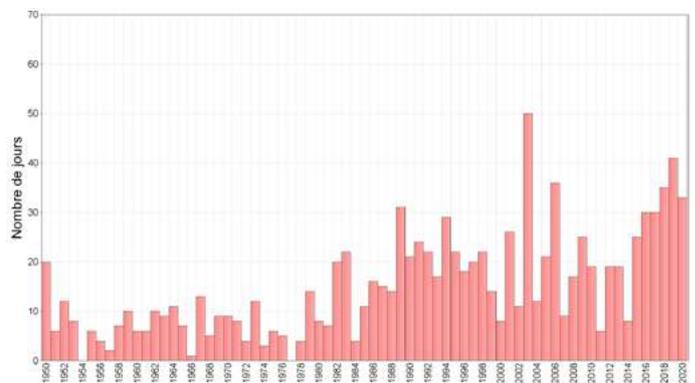


Figure 1.5. Évolution du nombre annuel de nuits tropicales à Nîmes de 1950 à 2020

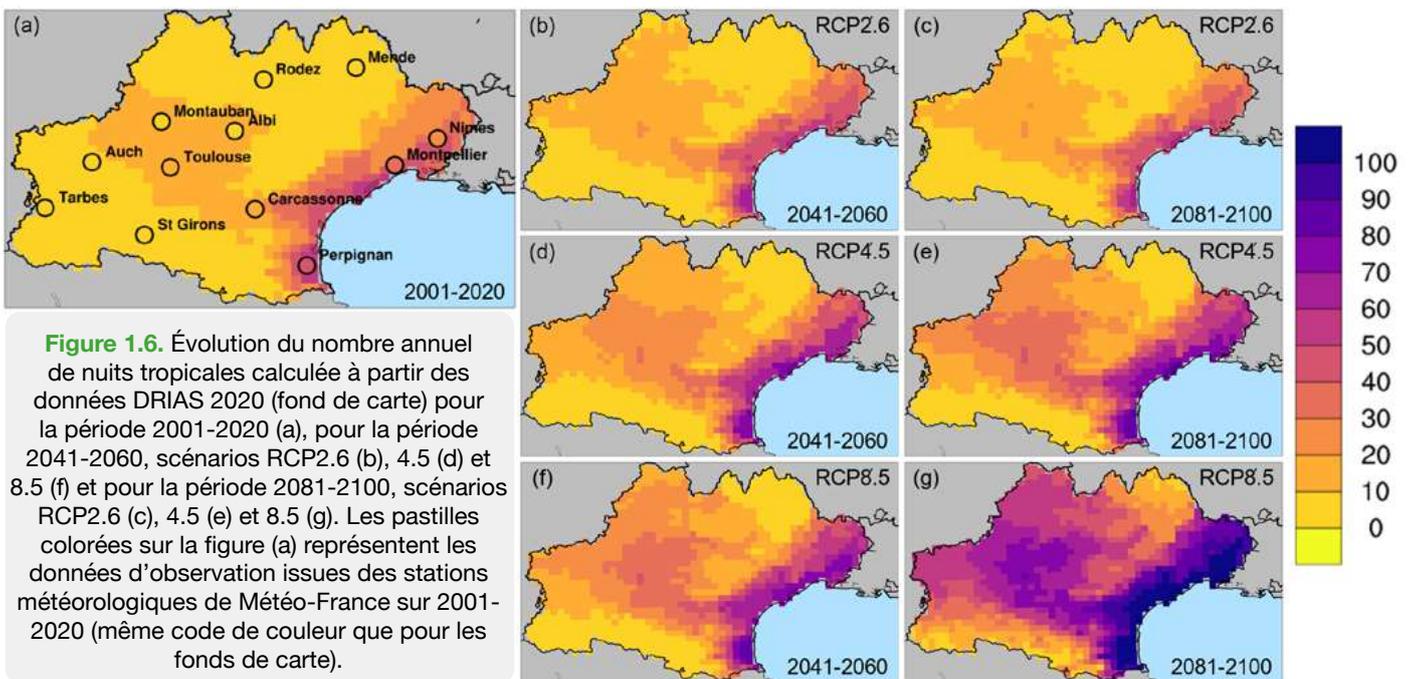


Figure 1.6. Évolution du nombre annuel de nuits tropicales calculée à partir des données DRIAS 2020 (fond de carte) pour la période 2001-2020 (a), pour la période 2041-2060, scénarios RCP2.6 (b), 4.5 (d) et 8.5 (f) et pour la période 2081-2100, scénarios RCP2.6 (c), 4.5 (e) et 8.5 (g). Les pastilles colorées sur la figure (a) représentent les données d'observation issues des stations météorologiques de Météo-France sur 2001-2020 (même code de couleur que pour les fonds de carte).

Encadré 1.B. La canicule de juin 2019 en Occitanie

Une façon d'illustrer l'impact de l'influence humaine sur les vagues de chaleur consiste à s'intéresser à un événement remarquable et à décrire ce qu'aurait été un événement « comparable » sans changement climatique, ou dans un climat de fin de XXI^e siècle. Du 27 au 29 juin 2019, l'Occitanie a connu une canicule remarquable, avec des températures qui ont atteint 46 °C le 28 juin à Vérargues dans l'Hérault (record absolu de chaleur pour la France métropolitaine à la date de parution de ce rapport). Dans le climat de 2019, un événement aussi chaud a une probabilité d'occurrence d'environ 10 % – on s'attend à observer un tel événement une fois tous les 10 ans en moyenne. Le calcul suggère que le réchauffement causé par l'homme a déjà multiplié par environ 25 cette probabilité ; le même événement serait donc extrêmement rare sans influence humaine (moins de 1 % de chances). Vu sous un autre angle, le même événement aurait été environ 1,9 °C moins chaud sans influence humaine sur le climat.

Si on regarde vers le futur cette fois, on peut estimer qu'un événement aussi chaud se produira en moyenne une année sur 4 au cours de la période 2025-2044, et qu'un événement aussi rare sera alors 1 °C plus chaud. En fin de XXI^e siècle (période 2081-2100), dans le scénario médian SSP2-4.5, cet épisode sera devenu un événement banal, puisque 9 étés sur 10 connaîtront une période de 3 jours plus chaude que celle vécue en 2019. La région serait alors exposée à des canicules nettement plus sévères, puisqu'une canicule survenant tous les 10 ans serait environ 3,5 °C plus chaude que celle de 2019. Toujours en fin de siècle, mais dans un scénario à plus fortes émissions (SSP3-7.0), les canicules se produisant une fois par décennie pourraient être environ 5,5 °C plus chaudes que l'événement de 2019. Inversement, des émissions plus faibles limiteraient l'ampleur des canicules attendues pour cette période.

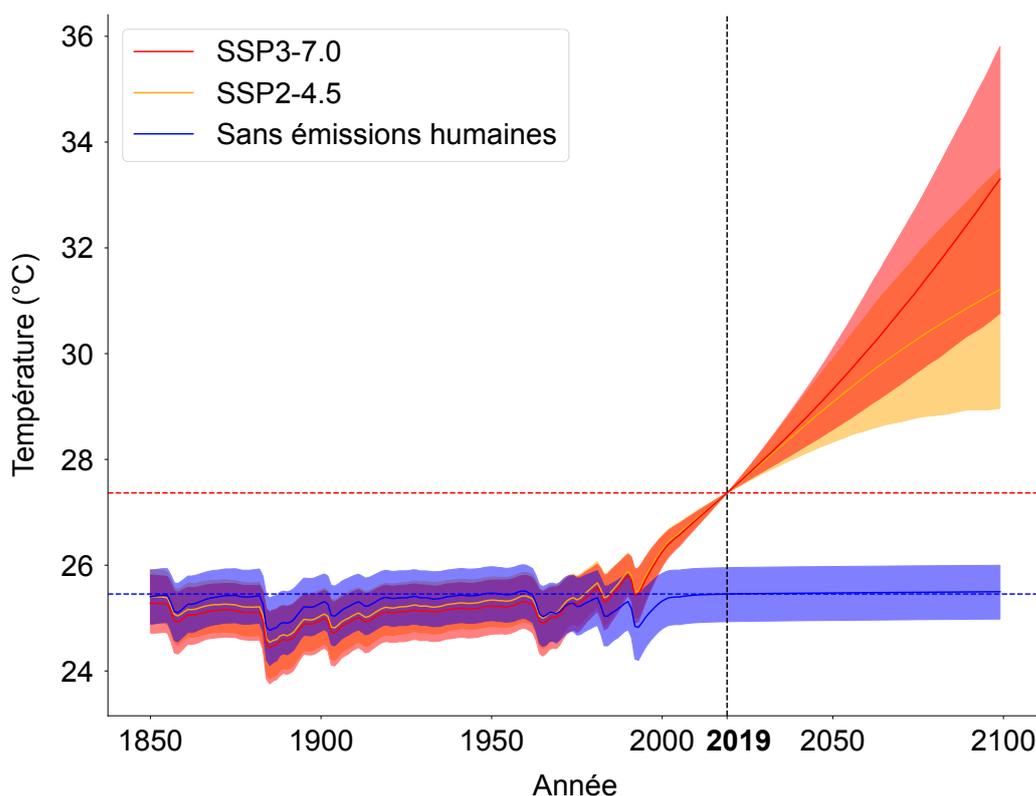


Figure 1.7. Évolution de la température d'une canicule aussi rare que celle de 2019 (probabilité d'occurrence de 10 %) dans un climat sans influence humaine (bleu), avec influence humaine (scénario médian SSP2-4.5, jaune), avec influence humaine et fortes émissions (scénario SSP3-7.0, rouge).

Évolution du cumul des précipitations

Une tendance à la baisse du cumul annuel des précipitations sur l'Occitanie de l'ordre de 15 mm par décennie (soit 1,6 %) est observée sur 1960-2020 (figure 1.2), mais sans significativité statistique⁵.

À l'échelle saisonnière, on observe également une diminution des précipitations en été, particulièrement en Languedoc-Roussillon, ces tendances étant significatives notamment sur le nord-ouest du département de l'Hérault. Une diminution (sans significativité statistique) des précipitations est également observée en hiver. En revanche, aucun changement de long terme des précipitations de printemps et d'automne n'a été mis en évidence. Compte-tenu de la variabilité naturelle relativement forte des précipitations d'une décennie à l'autre, les tendances des cumuls annuels et saisonniers dépendent en partie des périodes considérées (Dubuisson et al., 2020) et ne sont pas nécessairement imputables au changement climatique.

Les évolutions d'ici au milieu du siècle sont relativement faibles, de l'ordre de 5 % de baisse du cumul annuel et du nombre de jours de pluie par rapport à 2001-2020. Elles sont plus prononcées pour la fin de siècle, avec une baisse du cumul annuel de l'ordre de 11 % en RCP4.5 à 14 % en RCP8.5 et du nombre de jours de pluie respectivement de 15 à 17 % selon les régions. Quel que soit le scénario considéré, les tendances qui se dessinent pour la fin de siècle sont une légère augmentation possible des précipitations d'hiver, une baisse au printemps et à l'automne qui est du même ordre que celle du cumul annuel. Les changements sont plus marqués en été, avec une baisse de l'ordre de 14 % en RCP4.5 et 38 % en RCP8.5.

Neige

Toute la région peut être soumise à des événements neigeux à des fréquences et intensités variables, y compris le littoral méditerranéen. Des analyses de tendance de neige en plaine (altitudes inférieures à 500 m) montrent que sur 1960-2018, le nombre de jours avec chutes de neige a légèrement diminué (environ -1) sur la plus grande partie de la région, la diminution étant un peu plus importante (-3) en Ariège et dans l'Aude. Sur la même période, le nombre de jours avec au moins 1 cm de neige au sol a diminué de 2 à 6 (soit une baisse de 40 à 60 %) dans la moitié sud-ouest de la région et de 4 à 9 dans la moitié nord-est (soit une baisse de 60 à 80 % en moyenne, et plus de 80 % sur l'Hérault).

Les projections futures indiquent que les chutes de neige dépassant 1 cm en une journée deviendront de plus en plus rares. Notamment, en fin de siècle, dans le cas du scénario RCP8.5, les régions d'Occitanie de moins de 1000 m d'altitude ne devraient plus connaître de tels événements en automne et au printemps, et en hiver ils devraient être 5 à 10 fois moins nombreux qu'en 2001-2020. Ils seront moins exceptionnels à plus de 1000 m d'altitude, mais environ 3 fois moins fréquents qu'en 2001-2020. L'évolution des conditions d'enneigement en montagne est décrite dans le **chapitre-enjeu Milieux Montagnards**.

⁵ Le calcul de la tendance est ici une estimation statistique de la tendance « effective », mais cette estimation est très incertaine compte-tenu de la forte variabilité intrinsèque des précipitations d'une année ou d'une décennie à l'autre, même sur une période assez longue (60 ans ici).

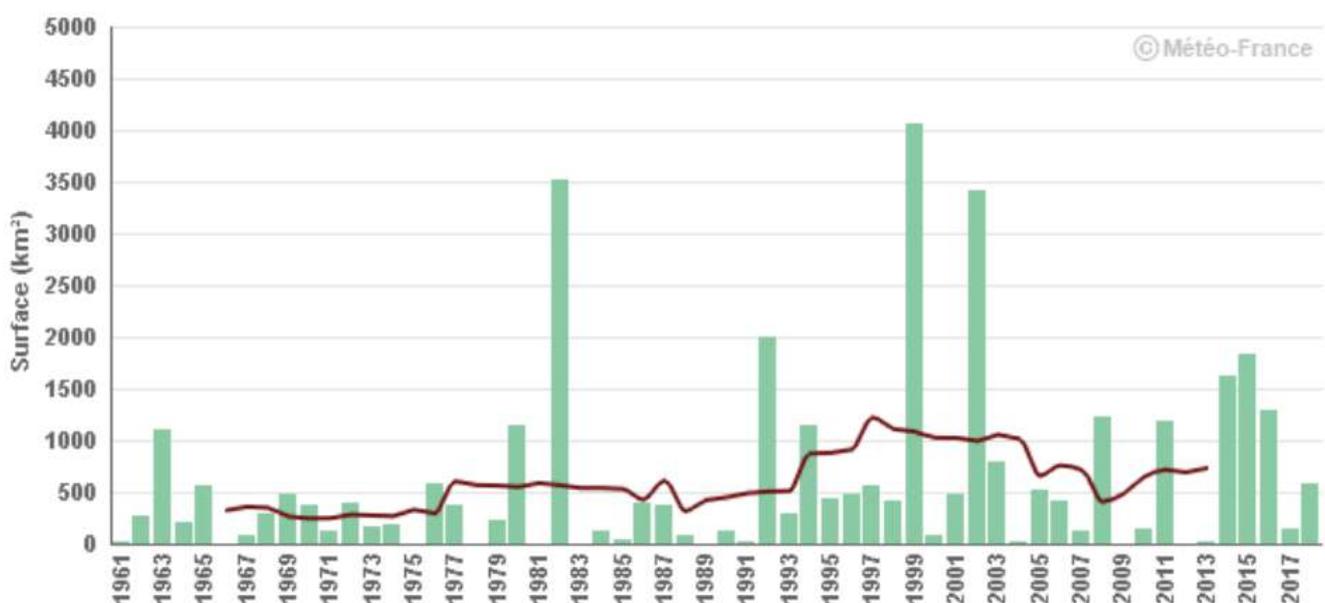


Figure 1.8. Évolution observée de la surface maximale impactée par des précipitations supérieures à 200 mm/jour sur le Languedoc-Roussillon. La courbe en rouge représente la moyenne glissante des données annuelles par périodes de 11 ans.

Évolution des pluies extrêmes

Une hausse de l'intensité et de la fréquence des précipitations extrêmes a été mise en évidence sur le pourtour méditerranéen (Ribes et al., 2019) avec une augmentation de l'ordre de 20 % des pluies maximales annuelles sur la période 1961-2015. L'évolution n'est pas aussi nette sur la région Occitanie (Dubuisson et al., 2020) mais une tendance à la hausse est observée sur la partie Languedoc-Roussillon pour la surface concernée par des événements de plus de 150 mm (Samacoits et al., 2021) et 200 mm (figure 1.8).

L'augmentation déjà observée de l'intensité des épisodes méditerranéens incite à s'intéresser à leur évolution future. Il est nécessaire pour cela de mettre en œuvre des modèles de climat capables de bien représenter ces phénomènes complexes. Jusqu'à récemment, les études s'appuyaient uniquement sur des ensembles de modèles régionaux de climat avec des résolutions spatiales voisines de dix kilomètres tels que le jeu DRIAS-2020. Elles indiquent une poursuite de l'intensification des précipitations quotidiennes extrêmes de l'ordre de 10 % en milieu de siècle, mais avec des différences assez marquées suivant les modèles. Toutefois, ces modèles ne permettent pas de représenter correctement l'ensemble des processus mis en jeu lors des épisodes orageux et sous-estiment les valeurs extrêmes des précipitations horaires.

Depuis peu, les équipes de recherche ont mis au point une nouvelle génération de modèles de climat. Avec des résolutions spatiales plus fines (2 à 3 km), une meilleure

représentation de la topographie et aussi de certains processus météorologiques, ces modèles apportent une valeur ajoutée nette pour la représentation des extrêmes de précipitations horaires (Ban et al., 2021) et en particulier des épisodes méditerranéens (Caillaud et al., 2021). Une première étude a été réalisée avec douze modèles et des simulations de 10 ans selon un scénario RCP8.5 (Pichelli et al., 2021). Sur les régions méditerranéennes françaises, en fin de siècle, les nouveaux modèles à haute résolution indiquent une hausse plus marquée des précipitations extrêmes horaires que les modèles à résolution plus grossière.

Cette hausse est voisine de 16 % en moyenne entre 1996-2005 et 2090-2099, avec des disparités entre les modèles. Ces premiers résultats demandent à être confirmés par des études sur des périodes plus longues et avec davantage de modèles, ce qui devrait permettre, dans les prochaines années, d'apporter des réponses plus robustes aux questions posées sur l'évolution future des caractéristiques des épisodes méditerranéens.

Évolution des sécheresses

Une augmentation des sécheresses est constatée en Occitanie du point de vue météorologique via le nombre annuel maximum de jours sans pluie consécutifs (Dubuisson et al., 2020) et pour la sécheresse des sols dont la surface moyenne a triplé en Occitanie sur la période récente par rapport aux années 1960 (figure 1.9). Il est attendu que ces évolutions se poursuivent en climat futur. Le nombre de jours secs pourrait ainsi augmenter d'environ 25 % en RCP4.5 et doubler en RCP8.5.

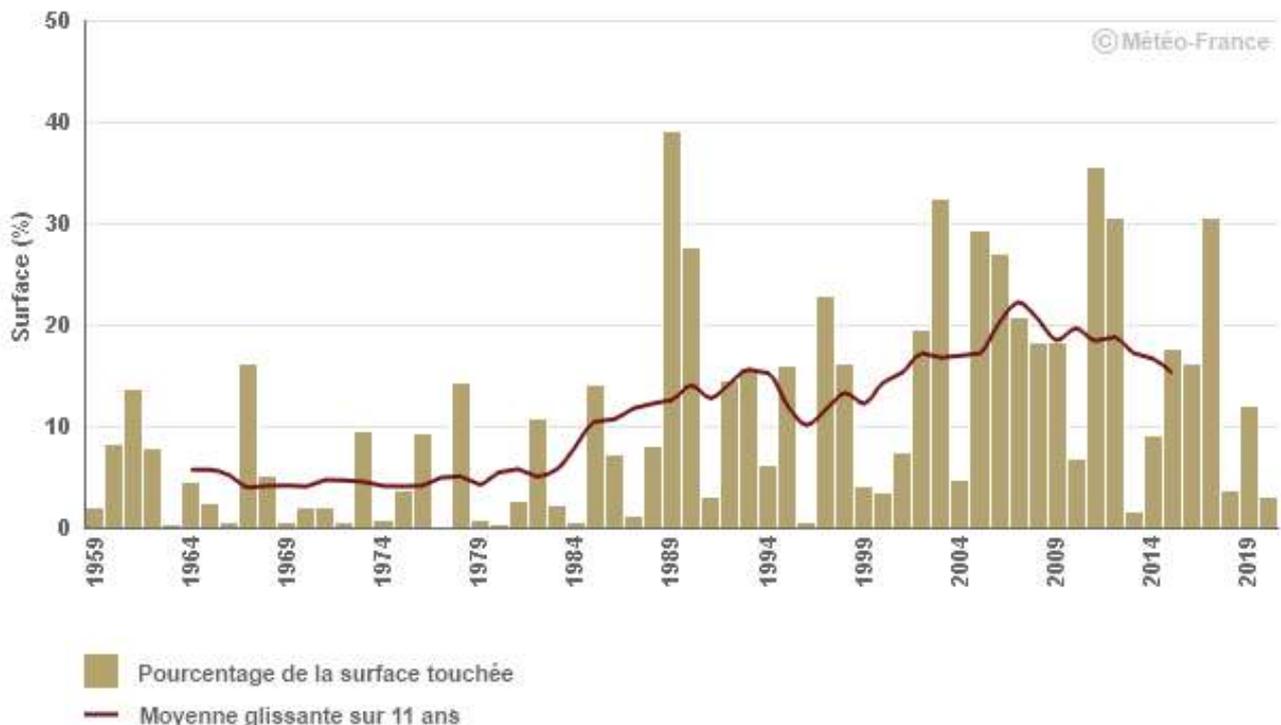


Figure 1.9. Pourcentage de la surface de l'Occitanie touchée par des sécheresses agricoles (sols secs) en moyenne annuelle (source Météo-France : ClimatHD). La courbe en rouge représente la moyenne glissante des données annuelles par périodes de 11 ans.

Évolution du rayonnement et de la durée d'ensoleillement

La quantité de rayonnement solaire atteignant la surface de la Terre est un facteur important pour de nombreux phénomènes et processus à la surface terrestre. Elle conditionne aussi le potentiel solaire des différentes régions et son évolution constitue donc un enjeu pour la transition énergétique. Ses variations sont principalement dues aux nuages et aux aérosols, particules liquides ou solides en suspension dans l'atmosphère. Les aérosols, qui interagissent avec le rayonnement et les nuages, proviennent de diverses sources, à la fois naturelles (par exemple les particules émises lors des éruptions volcaniques, les sels marins ou les poussières désertiques transportées depuis le Sahara), et d'origine humaine (notamment industrie et transport).

L'évolution passée du rayonnement en Occitanie depuis 1950 se sépare en deux périodes. Entre 1950 et la fin des années 1970, le rayonnement solaire atteignant la surface a diminué (période dite d'« assombrissement »), à cause de l'augmentation des émissions humaines d'aérosols. Ces aérosols renvoient en effet une partie du rayonnement vers l'atmosphère, l'empêchant d'atteindre la surface. A partir des années 1980, les émissions humaines d'aérosols ont diminué, entraînant une augmentation du rayonnement solaire en surface (période dite d'« éclaircissement »). Les observations sur 1981-2020 (stations météorologiques de Montpellier, Perpignan et Carcassonne) indiquent ainsi des augmentations de rayonnement solaire en surface de l'ordre de 7 à 10 %. Des simulations climatiques reproduisant la période 1961-2020 permettent d'interpréter ces observations, suggérant qu'elles sont compatibles avec les effets d'une diminution de la quantité d'aérosols, sans contribution significative des changements de nébulosité (couverture nuageuse). Sur le plus long terme, les simulations suggèrent que le rayonnement solaire en Occitanie sur la période actuelle (2001-2020) est supérieur de 2 à 6 W/m² en moyenne par rapport à la période 1961-1990, tandis que l'épaisseur optique des aérosols a diminué de 40 % sur cette période, la nébulosité moyenne n'ayant que faiblement évolué (-2 à +0,5 %).

Dans le futur proche (2025-2044), on s'attend à la poursuite de cette tendance, avec une baisse supplémentaire de l'effet des aérosols (pour atteindre -50 % par rapport à 1961-1990), et une augmentation du rayonnement qui pourrait atteindre 3 à 10 W/m². Pour la suite du XXI^e siècle, les simulations climatiques montrent que le rayonnement solaire en surface continue à augmenter (+3 à 12 W/m² pour 2041-2060, +5 à 18 W/m² pour 2081-2100, toujours par rapport à 1961-1990), mais qui serait davantage due à partir du milieu du XXI^e siècle à une diminution de la nébulosité qu'à une diminution supplémentaire des concentrations en aérosols. Il y a cepen-

dant de fortes incertitudes sur la quantification de cette diminution de la nébulosité, qui pourrait être de l'ordre de 3 à 9 % pour 2081-2100 par rapport à 1961-1990. En tout cas, on s'attend donc à une augmentation continue du rayonnement solaire incident en surface au XXI^e siècle en Occitanie, avec à la clé notamment une augmentation de la production d'énergie solaire et des conséquences pour l'agriculture et les écosystèmes terrestres.

La durée annuelle d'ensoleillement observée présente de fortes variations d'un lieu à l'autre de l'Occitanie. Elle est supérieure à 2400 h sur la côte languedocienne (proche de 2660 h à Montpellier et Nîmes, et de 2460 h à Perpignan pour la période 1991-2010), et décroît en direction du sud-ouest de la région de 2100 h en Aveyron à moins de 2000 h sur la moitié sud des Hautes-Pyrénées, en passant par 2030 h à Toulouse. La durée d'ensoleillement varie selon des échelles de temps de plusieurs dizaines d'années et n'est pas en cohérence avec celle du rayonnement solaire : ainsi entre 1951-1970 et 1991-2010, la durée annuelle d'ensoleillement a baissé d'environ 50 h à Montpellier et Nîmes, 70 h à Perpignan et 60 h à Toulouse. La génération de modèles utilisés pour DRIAS 2020 ne permet pas de fournir des projections pour cette variable.

Évolution du vent

Analyser les changements passés des caractéristiques du vent et estimer les évolutions à venir constitue un enjeu notamment pour évaluer les changements de potentiel éolien, mais aussi les risques liés aux événements violents (tempêtes). Concernant les changements passés, il existe peu de séries anciennes fiables pour quantifier l'évolution de la force du vent. Une analyse des données disponibles (Soubeyrou et al., 2021) montre une diminution de la force du vent moyen à Millau (-15 % entre 1970 et 2020) et Mouthoumet dans l'Aude (-7 % entre 1990 et 2020), mais une augmentation à Toulouse (+13 % entre 1970 et 2020).

Ces chiffres recouvrent des évolutions qui peuvent être très différentes sur des périodes plus courtes. Les données de la réanalyse SAFRAN (Vidal et al., 2010) montrent par ailleurs des tendances généralement faibles en Occitanie (Soubeyrou et al., 2021). Pour le futur, les simulations climatiques de DRIAS 2020 projettent une légère baisse de la force du vent sur la partie méditerranéenne de l'Occitanie mais n'indiquent pas de tendance ailleurs.

Par ailleurs, le nombre de tempêtes ayant affecté l'Occitanie entre 1980 et 2020 ne montre pas non plus de tendance. À titre d'exemple, sur la période 1980-1989, l'ancienne région Midi-Pyrénées a connu en moyenne près de 10 tempêtes par an, un peu plus de 2 seulement en 2000-2009 et près de 8 en 2010-2019⁶.

⁶ Source : tempetes.meteofrance.fr/

Mer Méditerranée : changements récents et futurs au large des côtes occitanes

Le réchauffement climatique d'origine humaine affecte l'océan aussi bien que les continents, entraînant des impacts sur les écosystèmes marins et les activités humaines liées à la mer. L'évolution passée et future de l'océan n'est pas constante dans le temps ni homogène spatialement, d'où l'intérêt de l'étudier spécifiquement pour la mer Méditerranée au large des côtes de l'Occitanie avec des observations et des modèles adaptés à la complexité des phénomènes atmosphériques et océaniques de la zone.

Notre évaluation de l'évolution passée des températures et salinités de surface s'appuie sur un jeu de données compilé par l'Instituto Mediterraneo de Estudios Avanzados (IMEDEA) à partir des observations collectées en mer Méditerranée. L'évolution future s'appuie sur un ensemble récent de simulations à haute résolution menées avec plusieurs modèles dans le cadre de l'initiative internationale Med-CORDEX (Ruti et al., 2016).

Au cours des dernières décennies, on a observé que les eaux de surface au large de l'Occitanie se sont réchauffées en moyenne de 0,4 °C entre 1961-1990 et 1996-2015 (figure 1.10) et leur salinité de surface a augmenté faiblement de 0,03 g / kg. Dans les deux cas, l'augmentation est proche de celles mesurées à l'échelle de l'ensemble de la mer Méditerranée quoique légèrement inférieure.

D'ici à 2050, le réchauffement des eaux de surface devrait se poursuivre et s'amplifier pour atteindre selon les modèles entre 0,4 et 1,1 °C en milieu de siècle (2041-2060) par rapport à 2001-2020 (figure 1.10). Au delà, le réchauffement devrait se poursuivre avec une distinction nette entre le scénario médian RCP4.5 (entre 1,0 et 1,4 °C pour la période 2081-2100) et le scénario à fortes émissions RCP8.5 pour lequel le réchauffement des eaux de surface proche de l'Occitanie pourrait atteindre entre

2,3 et 2,9 °C à la fin du XXI^e siècle. Ces valeurs restent plus faibles que le réchauffement prévu sur les surfaces continentales, contribuant à renforcer le contraste terre-mer de température et les circulations atmosphériques associées. Le réchauffement devrait être plus fort que les valeurs moyennes en été et plus faible en hiver.

En l'état actuel des connaissances, l'évolution future de la salinité de surface est très incertaine dans cette zone, certains modèles prévoyant son augmentation et d'autres sa diminution quel que soit l'horizon temporel et le scénario retenu. On note par exemple des gammes de valeurs possibles entre -0,36 et +0,13 g / kg en milieu de siècle par rapport à l'état actuel.

En mer Méditerranée, les périodes où la surface de la mer est anormalement chaude, également appelées « vagues de chaleur marine », sont devenues plus fréquentes, plus intenses et plus étendues au cours des dernières décennies. Pour illustrer cette tendance, on peut souligner que 14 vagues de chaleur marine se sont produites en Méditerranée sur 2008-2017 contre seulement 2 sur 1982-1991. Dans le futur, les vagues de chaleur marine océaniques vont très probablement devenir plus étendues, plus longues et plus intenses qu'aujourd'hui. La sévérité de cette évolution dépendra fortement de l'horizon temporel et de l'évolution des gaz à effet de serre. Sous le scénario RCP8.5, la canicule océanique de 2003 pendant laquelle une anomalie de température de surface de 4 °C a été observée dans le Golfe du Lion, pourrait devenir un événement normal vers 2050 et un événement de faible intensité en fin du siècle.

Le réchauffement de la mer Méditerranée implique une dilatation, donc une hausse du niveau marin, à laquelle contribuent également notamment la fonte des glaciers et des calottes glaciaires. Au large de l'Occitanie, la hausse sur 1885-2009 est probablement proche des observations du marégraphe de Marseille (environ 1,4 mm/an sur 1885-2009), compte-tenu des faibles variations spatiales du phénomène en mer Méditerranée (Wöppelmann and Marcos, 2012). Le phénomène s'est accéléré sur les dernières décennies, les mesures par satellite montrant une hausse du niveau marin de l'ordre de 2,7 mm/an au large de Sète sur 1993-2017 (Mohamed et al., 2019). La hausse du niveau marin se poursuivra au cours du XXI^e siècle. En moyenne sur l'ensemble du bassin méditerranéen, les estimations vont de +37 cm à +90 cm par rapport à la fin du XX^e siècle, selon le scénario d'émissions considéré (rapport MedECC). Les variations d'une zone à l'autre de la Méditerranée se limitant généralement à 10 cm, ces estimations de montée du niveau marin peuvent être considérées comme pertinentes au large des côtes occitanes.



Crédit photo : X. Ducommun-Ricoux, 2021

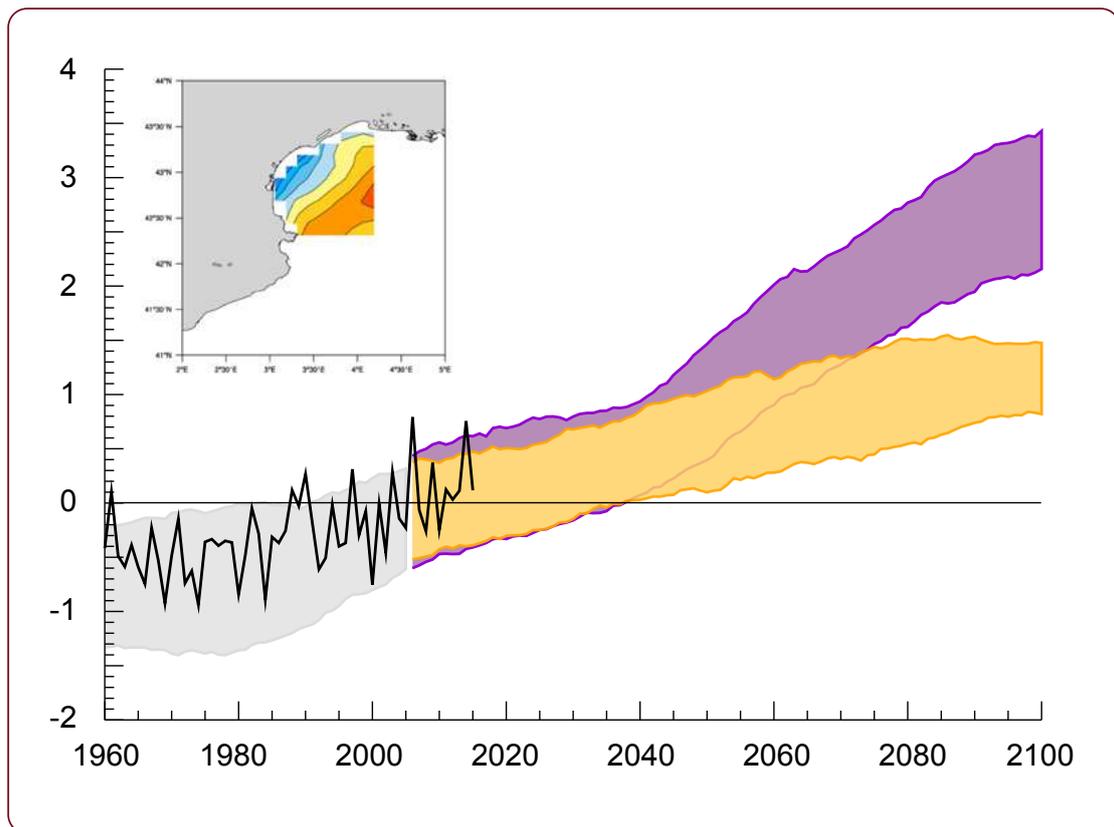


Figure 1.10. Séries des anomalies annuelles de la température de surface (trait plein, remplissage plein) par rapport au climat présent (2001-2020) pour la mer Méditerranée au large de l'Occitanie (domaine exact incrusté en carte) pour les observations (noir), les simulations historiques de l'initiative Med-CORDEX (gris), les scénarios RCP4.5 (orange) et RCP8.5 (violet). Un lissage glissant sur 20 ans a été appliqué aux simulations.



Crédit photo : pixabay.com



CHAPITRE

2

BIODIVERSITÉ

Coordination : Bertrand SCHATZ et Bénédicte GOFFRE

Chapitre rédigé en collaboration avec l'Agence Régionale de la Biodiversité d'Occitanie (ARB Occitanie)

Contributions : Renaud BARBERO, Yves CARAGLIO, Christophe DRÉNOU, Jean-Luc DUPUY, Hélène FARGEON, Perrine GAUTHIER, Bénédicte GOFFRE, Éric IMBERT, Éric NICOLINI, Nicolas MARTIN-St-PAUL, Emmanuel MÉNONI, Thomas OPITZ, François PIMONT, Éric RIGOLOT, Julien RUFFAULT, Sylvie SABATIER, Bertrand SCHATZ, John THOMPSON, Morgane VILLETARD.

Introduction

Bertrand SCHATZ (CNRS - CEFE)

L'Occitanie est un territoire remarquable par son importante richesse en espèces, en paysages et en milieux naturels, donc en biodiversité. C'est la seule région de France métropolitaine située sur quatre domaines bioclimatiques, définissant quatre grands ensembles géographiques mais aussi quatre orientations d'activités humaines : 1) les montagnes et vallées des Pyrénées, 2) les côtes et bordures méditerranéennes, 3) les monts et plateaux du Massif central, et 4) les plaines et coteaux du Midi-Pyrénées.

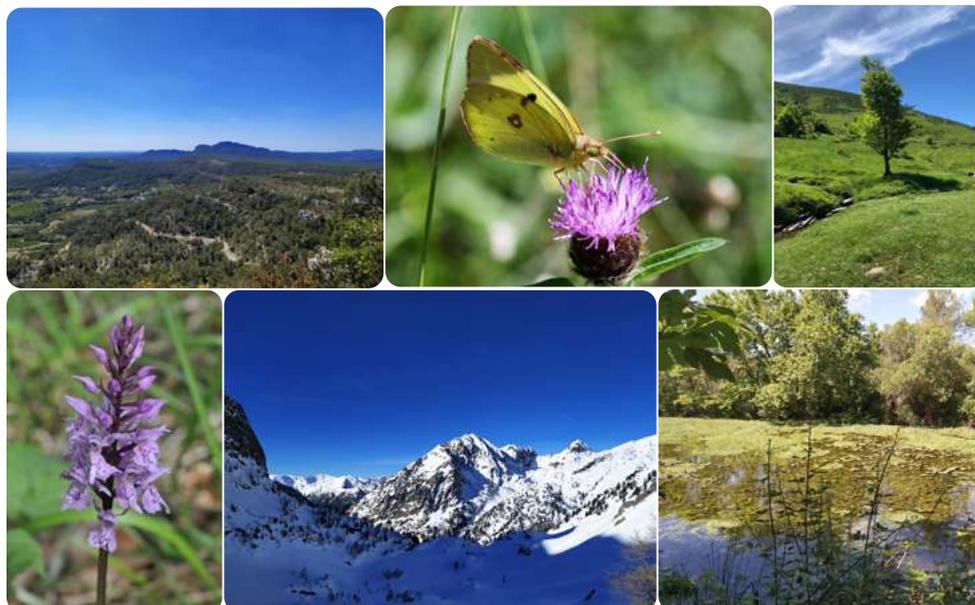
La première partie de ce chapitre (« État des lieux ») présente l'abondance totale en espèces avec une forte représentation des différents groupes d'espèces présents à l'échelle nationale, avec cependant plusieurs groupes encore méconnus. L'Occitanie héberge de nombreuses espèces endémiques, mais aussi une grande diversité d'habitats naturels avec des milieux originaux très rares au niveau national ou européen. Son Schéma Régional de Cohérence Écologique (SRCE) permet de définir son organisation fonctionnelle avec des zones de réservoir de biodiversité et des zones de déplacement de la biodiversité entre ces réservoirs. Cette région a donc une responsabilité importante de conservation du patrimoine naturel, notamment face aux changements climatiques.

La deuxième partie (« Menaces liées aux changements globaux ») inventorie les menaces principales pesant sur cette biodiversité. Les changements climatiques sont croissants en Occitanie, avec de records nationaux de température, les célèbres épisodes cévenols et les fréquents incendies (Meddec, 2020). Ils affecteront l'ensemble des milieux naturels d'Occitanie, mais de manière exacerbée dans les milieux littoraux et montagneux. Cette région est aussi impactée par des pollutions des sols et de l'eau avec les pesticides agricoles (Atmo Oc-

citanie, 2019) avec de fortes disparités départementales, mais aussi des pollutions de l'air (ozone, particules fines) et des pollutions localisées (métaux lourds). Accueillant annuellement plus de 50 000 nouveaux arrivants, l'Occitanie est aussi marquée par un fort développement urbain autour des grandes villes et par un afflux touristique estival massif sur le littoral, ainsi que par un niveau important d'artificialisation (infrastructures, industrie, tourisme, espaces commerciaux, réseaux de transport).

La troisième partie (« Pistes de solutions ») propose des solutions en répertoriant tout d'abord les espèces protégées puis les aires protégées. La distinction des quatre grands ensembles régionaux montre que ces dernières sont très présentes au sud dans les Pyrénées et au nord dans le Massif central mais assez rare à l'est sur le littoral méditerranéen (un seul PNR), et à l'ouest dans les plaines de la partie Midi-Pyrénées. Cette situation semblant déséquilibrée reflète la répartition des zones de réservoir de biodiversité et celles des zones agricoles respectivement ; le dispositif actuel de protection des espèces naturelles permet cependant de couvrir les zones réservoirs de biodiversité définies dans le SRCE et la grande majorité des espèces à enjeux, avec une proportion relativement importante de l'Occitanie concernée par les aires protégées (Vimal, 2010).

Du fait de sa géographie à la croisée de quatre ensembles biogéographiques, l'Occitanie est donc marquée par une biodiversité très riche mais aussi par de forts impacts des activités humaines, avec des disparités régionales. Il est donc nécessaire d'accélérer les politiques de transition écologique, de rester flexibles aux enjeux émergents de conservation et de trouver les moyens et les solutions fondées sur la nature pour y réussir le défi du développement durable.



Crédit photos : haut-gauche : ARB Occitanie (V. Meslier) ; haut-milieu : JP Dhont – Gard Nature ; haut-droite : ARB Occitanie (C. Bedel) ; bas-gauche : T. Percie du Sert ; bas-milieu et droite : ARB Occitanie.

PARTIE ÉTAT DES LIEUX

La diversité biologique en Occitanie

Bertrand SCHATZ (CNRS - CEFE)

L'Occitanie a une histoire plurimillénaire de présence humaine ayant modelé les paysages, eux-mêmes associés à des géologies variées. C'est la seule région française à présenter quatre domaines bioclimatiques : méditerranéen près du littoral, montagnard dans les Pyrénées, continental au nord dans le Massif central et atlantique à l'ouest en Midi-Pyrénées. La flore y est ainsi particulièrement diversifiée avec de nombreuses espèces endémiques, donc à aire de distribution restreinte. L'ensemble de ces particularités biogéographiques et floristiques forme des paysages marqués et diversifiés expliquant la présence d'une biodiversité exceptionnelle. C'est une des régions de France métropolitaine les plus riches en biodiversité et les plus diversifiées en termes d'habitats. Elle fait également partie du bassin méditerranéen, reconnu comme un des 34 points chauds de biodiversité à l'échelle mondiale.

Le nombre d'espèces animales par groupe taxonomique présent en Occitanie est important, et représente une large proportion de celles présentes en France métropolitaine (Blondel et al., 2010). Plusieurs groupes taxonomiques d'espèces animales présents en Occitanie représentent plus de 80 % des espèces de France métropolitaine. Pour les espèces végétales, le nombre d'espèces recensées en Occitanie (uniquement les espèces indigènes) est de 4401 pour la flore vasculaire, 980 pour les bryophytes (mousses), 35 pour les charophytes (algues). Ainsi, l'Occitanie a une responsabilité patrimoniale face aux autres régions pour la conservation de l'ensemble ces espèces et des écosystèmes face aux changements globaux en cours, dont notamment les changements climatiques. Le recensement de notre connaissance sur les espèces régionales est encore loin d'être exhaustif, notamment sur les insectes, la fonge, la faune et la flore marine.

À ces chiffres, il faut ajouter les espèces exotiques envahissantes (EEE), plus ou moins importantes selon les groupes taxonomiques. Ces EEE menacent souvent les espèces locales rares ou vulnérables en occupant leur habitat et perturbe parfois considérablement le fonctionnement des écosystèmes. Par exemple, l'étang de Thau est à présent colonisé par des macro-algues exotiques, ce qui menace directement cet écosystème naturel mais aussi les activités économiques locales comme la conchyliculture (voir chapitre-enjeu Milieux littoraux). La région Occitanie reste très riche en biodiversité parfois unique à l'échelle nationale comme pour l'isard, le bouquetin ibérique, le desman des Pyrénées (présent aussi en Nouvelle Aquitaine), l'ours brun, trois espèces de poissons (chabot du Lez, chabot de l'Hérault, vairon de Septimanie), les trois lézards pyrénéens (de Bonnal, du Val d'Aran et d'Auréliou), l'euprocte des Pyrénées,

30 espèces de mollusques dont la moitié rattachée aux milieux souterrains, plusieurs plantes endémiques (comme l'alysson des Pyrénées, l'aster des Pyrénées, l'ophrys de l'Aveyron, l'ophrys d'Aymonin, la ligulaire de Sibérie), mais aussi quelques espèces de libellules, de papillons, de coléoptères et d'hyménoptères. Les espèces endémiques se concentrent dans les Pyrénées, le sud du Massif central (Cévennes, Grands Causses) et à un moindre degré sur le littoral. Certaines espèces ont bénéficié de programmes de réintroduction comme l'ours, le castor, le gypaète barbu, les vautours fauves et moines, le chamois et le bouquetin ibérique, donc surtout de grandes espèces emblématiques et pas encore suffisamment sur des espèces plus discrètes.

En décembre 2020, presque 5 millions de données naturalistes (4 740 456 données faune-flore mutualisées) sont regroupées dans le SINP Occitanie (SINP : Système d'Information de l'Inventaire du Patrimoine Naturel). Développé par la DREAL Occitanie et opérationnel depuis 2020, le [SINP](#) régional est une organisation collaborative décentralisée dont l'objectif est de mutualiser toutes les données d'observation de biodiversité (faune, flore, fonge). À cette date, ces informations sont majoritairement issues des associations (61 %), puis des entreprises (bureaux d'étude) (23 %), des collectivités territoriales (12 %) alors que les parcs nationaux et les laboratoires ne fournissent chacun que 2 % des données. Les sciences participatives concernant plusieurs groupes taxonomiques sont aussi de grandes pourvoyeuses d'informations naturalistes. Cette structure s'inscrit dans le défi n°4 de la [Stratégie régionale pour la biodiversité](#) : mieux connaître, mieux partager pour mieux agir individuellement et collectivement.

Aller plus loin :

- [Évolution](#) de la connaissance sur la biodiversité.
- [Panorama](#) de la biodiversité en Occitanie.



L'ophrys d'Aymonin est endémique des plateaux calcaires de la région des Grands Causses. Protégée dans l'ex-région de Midi-Pyrénées mais pas en ex-Languedoc-Roussillon, cette espèce est menacée et mériterait une protection régionale en Occitanie.
Crédit photo : B. Schatz.

Les écosystèmes d'Occitanie

Bertrand SCHATZ (CNRS - CEFE)

Classiquement, les analyses cartographiques définissent quatre grands types d'occupation du sol qui par ordre décroissant de surface sont : 1) les zones agricoles ; 2) les forêts et les autres milieux naturels ; 3) les zones urbanisées et artificialisées et 4) les zones humides et les eaux continentales (rivières, lacs, lagunes). En Occitanie, cet ordre est respecté avec au premier rang les surfaces agricoles qui concernent plus de la moitié des surfaces, qui se composent grossièrement pour un tiers de terres arables donc cultivées, un petit tiers de cultures permanentes (vignes, arboriculture) et de prairies et un gros tiers de zones agricoles plus hétérogènes. La carte régionale des orientations agricoles en Occitanie montre avant tout l'importance de l'usage agricole mais aussi de grandes disparités intrarégionales dans ces usages avec principalement de nettes dominances de la viticulture sur la bande littorale (du Gard au nord des Pyrénées-Orientales), de cultures céréalières et d'oléagineux dans les plaines du sud-ouest, et de l'élevage bovin ou ovin/caprin ou de poly-élevage dans les zones montagneuses des Pyrénées et dans le sud du Massif central.

Ainsi, les quatre grands ensembles biogéographiques régionaux correspondent aussi à des usages agricoles différents, en lien avec la ressource en eau, et la nature des sols. La transition écologique de l'Occitanie passe donc par celle de son agriculture, notamment en réduisant la consommation d'eau, l'usage de pesticides et d'engrais et en augmentant la part de l'agriculture biologique et les pratiques agroécologiques pour être plus résilient face aux impacts actuels et futurs des changements climatiques (**voir chapitre-enjeu Agrosystèmes**).

Viennent ensuite les milieux forestiers avec presque 30 % de la superficie régionale, qui sont surtout présents dans le massif pyrénéen et le sud du Massif central (Cévennes, Haut-Languedoc et autour du Quercy) et se composent essentiellement de forêts privées (**voir focus milieux forestiers**). Parmi les autres milieux naturels, les milieux caussenards (Grands Causses et Causse du Quercy) sont tout à fait exceptionnels à l'échelle nationale, voire européenne (**voir focus milieux secs**). Depuis l'après-guerre, il faut noter ici l'embroussaillage généralisé par abandon de pâturage en garrigues et la reforestation par plantation d'essences exotiques (pin noir d'Autriche) et par colonisation d'essence méditerranéenne (pin d'Alep), ces résineux constituant des habitats sensibles au risque d'incendies (Boulant, 2008). De leur côté, les milieux artificialisés regroupent 3,27 % de zones urbanisées auxquels il faut ajouter 0,63 % de zones industrielles et commerciales, 0,17 % d'espaces verts artificialisés, et 0,13 % des mines, décharges et chantiers. Donc un total de 4,2 %, correspondant souvent à des zones d'îlots de chaleur et de vulnérabilité aux inondations du fait de leur imperméabilisation. Enfin, les

zones humides et les eaux continentales représentent 0,8 %, avec une proportion notable des lagunes côtières.

Entre 1998 et 2019 et par rapport à l'échelle nationale (France métropolitaine), l'Occitanie a conservé plus de forêts et de zones (semi)-naturelles (+9,4 %) et reste globalement moins agricoles (-7,8 %) et moins urbanisées (-1,8 %). Ces différences s'expliquent sûrement par l'importance des massifs montagneux régionaux, mais elles cachent aussi de grosses disparités entre départements. Le Gers est agricole sur plus de 80 % de son territoire (plus de 70 % pour le Tarn-et-Garonne), alors que la Lozère est forestière/naturelle à plus de 70 % (proche de 70 % pour les Pyrénées Orientales et l'Ariège). La Haute-Garonne, suivie de l'Hérault et du Gard sont les plus urbanisés, et les quatre départements du littoral regroupent la majorité des eaux continentales par la présence des lagunes côtières.

Certains habitats bénéficient d'une reconnaissance internationale comme les habitats d'intérêt communautaires par l'Union européenne ([directive habitats](#)), mais aussi les sites Ramsar (**voir focus zones humides**). L'UICN a aussi récemment étendu son système de listes rouges aux écosystèmes, en commençant par les littoraux méditerranéens de France métropolitaine (UICN 2020) ; l'Occitanie est directement concernée par le classement d'écosystèmes en danger (EN) des « dunes blanches méditerranéennes » et les classements en écosystèmes vulnérables (VU) de plusieurs milieux du littoral.

Aller plus loin :

- Orientations agricoles en Occitanie (carte 51 de la cartothèque de la démarche H2O 2030, [en ligne](#))
- Occupation du sol en Occitanie (carte 47 de la cartothèque de la démarche H2O 2030, [en ligne](#))



Troupeau pâturant sur une prairie naturelle, un habitat en régression en Aubrac. Crédit photo : B. Schatz.

Focus milieux forestiers

Bénédicte GOFFRE (ARB Occitanie)

Les milieux forestiers d'Occitanie couvrent près de 36 % du territoire régional (2,76 millions d'hectares) (**figure 2.1**). Inégalement répartis, ils sont largement regroupés dans le Massif central (Cévennes, Montagne noire et Haut-Languedoc) et les Pyrénées. Les boisements feuillus dominant (60 % sont des chênaies sclérophylles ou caducifoliées, des hêtraies ou des forêts de ravins), alors que les boisements résineux, situés sur le pourtour méditerranéen, sont surtout des pinèdes.

La diversité des forêts régionales masque une hétérogénéité entre deux vocations forestières extrêmes. L'orientation vers la production de bois monospécifique est associée à une simplification des écosystèmes forestiers à faible résilience face aux risques, dont ceux climatiques. Les impacts de la gestion et l'exploitation sylvicole sont positifs à négatifs sur la biodiversité forestière selon les pratiques employées. À l'inverse, les milieux forestiers en libre évolution sont souvent très riches en biodiversité (**Rossi et al., 2013**) et rendent de nombreux services écosystémiques : préservation des ressources en eau, en matériau et en énergie, séquestration du carbone (arbre sur pied, bois mort, sols forestiers) et rafraîchissement, préservation des sols contre l'érosion, et support à des services culturels (loisirs, paysages, tourisme, chasse, cueillette...).

L'Occitanie porte également une responsabilité forte dans la conservation de ses forêts anciennes, surtout présentes dans les Pyrénées (**Savoie et al., 2015**) et le Massif central (**Renaux et Villemeij, 2017**), et ponctuellement en plaine (**Goux et Savoie, 2019**). 7900 ha de forêts anciennes ont été recensés dans l'ouest pyrénéen, donc 2 % des forêts de montagne. Désormais rares et souvent fragmentées, elles sont des réservoirs riches de biodiversité marqués par la présence d'espèces indicatrices d'ancienneté, indispensables de préserver (**Rossi et al., 2013**). Véritables laboratoires des dynamiques naturelles, elles sont sources de connaissances à l'élaboration d'itinéraires sylvicoles durables, et de résilience naturelle face aux changements climatiques.

Les forêts matures feuillues et résineuses, riches en arbres sénescents et en bois mort, participent à la très grande valeur biologique du massif pyrénéen et figurent parmi les milieux à plus forte naturalité de la région (**voir chapitre-enjeu Milieux montagnards**). Le bois mort offre aussi des habitats indispensables à la conservation de nombreuses espèces d'invertébrés saproxyliques, de plantes (surtout des mousses, des lichens) et de champignons. La préservation intégrale (création d'îlot de sénescence dans les deux parcs nationaux, réserves biologiques intégrales ou dirigées) d'îlots de forêts anciennes au sein de la mosaïque d'habitats (semi-)naturels est le garant de la conservation des cortèges de communa-

tés des grands équilibres biologiques. Menacés d'exploitation ou de destruction, ces milieux nécessitent une reconnaissance spécifique afin de garantir leur préservation d'autant qu'il n'existe pas de statut de protection dédié.

Les milieux forestiers sont particulièrement concernés par les effets des changements climatiques, même si certaines espèces méditerranéennes sont adaptées à la sécheresse (pin d'Alep, chêne vert). La sécheresse croissante des sols provoque des baisses de croissance et des dégradations sanitaires (sensibilité aux maladies), affectant les services rendus par la forêt. Les feux de forêt s'en trouvent aussi augmentés en fréquence et en importance par accroissement de l'inflammabilité et de la combustibilité des structures végétales. À une échelle temporelle plus longue, l'aire de répartition de certaines espèces pourrait remonter en France méditerranéenne depuis l'Espagne et l'Italie (chêne faginé, chêne baillotte...).

En montagne, l'élévation prédite de la limite forestière (en lien également avec la déprise pastorale) doit s'accompagner de l'élévation des espèces dépendantes de ces zones refuges d'altitude malgré la réduction de surface associée, enjeu identifié notamment dans le SRCE (notamment en Lozère et dans les Pyrénées-Orientales). La biodiversité endémique montagnarde d'Occitanie pourrait souffrir de ces perturbations, ce qui augmente l'intérêt d'études et de suivis sur différentes échelles spatiales et temporelles, afin d'envisager les meilleures réponses possibles.

À noter la présence du pin de Salzmann (*Pinus nigra subsp. salzmanni*), un taxon franco-ibérique, qui a connu une très forte régression du fait du surpâturage, des incendies et de l'hybridation avec d'autres sous-espèces de pin noir utilisées en reboisements dans son aire naturelle (l'exotique pin noir d'Autriche, et le pin laricio de Corse). En accueillant la plus grande partie de ses populations, l'Occitanie a une responsabilité majeure pour la conservation de cette espèce, dont les boisements sont aujourd'hui morcelés et principalement sur dolomies ou calcaires dolomitiques (Causses) et sur roches siliceuses (Pyrénées-Orientales et Cévennes).

Dans le cas des hêtraies de la réserve naturelle nationale de la **Massane** (Pyrénées-Orientales), un suivi de la dynamique forestière permet d'étudier les conséquences des changements climatiques afin d'optimiser sa gestion sylvicole. Ce suivi est réalisé depuis 1999 sur 50 000 arbres (28 ha cartographiés exhaustivement) et a permis à cette réserve et à la Fédération des réserves naturelles catalanes (FRNC) d'intégrer le projet Life Natur'Adapt.

Focus zones humides

Bénédicte GOFFRE (ARB Occitanie)

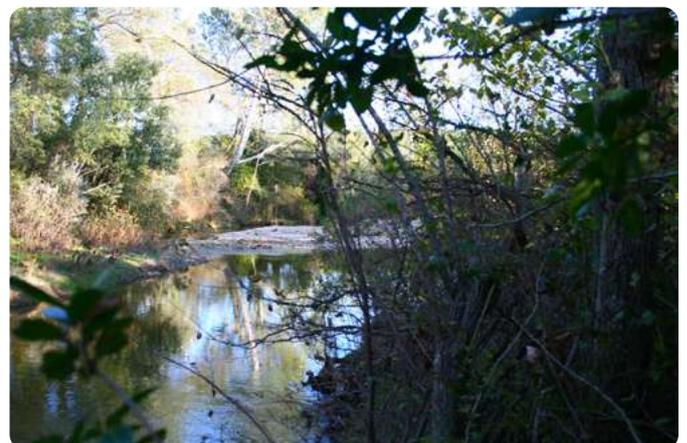
Les zones humides en Occitanie couvrent une superficie d'environ 100 000 hectares, soit 1,5 % de la surface régionale (**figure 2.2**). Environ 50 000 zones humides sont inventoriées, parmi lesquelles 70 % ont une surface inférieure à 1 ha. Une plus forte densité de zones humides, avec notamment des surfaces plus importantes, est observée en tête de bassin versant, en zones de montagne et sur le littoral. Les zones humides, à l'interface entre l'eau et la terre sont des milieux riches en termes de biodiversité qui abritent le plus souvent une biodiversité patrimoniale. Ainsi, certaines espèces inféodées aux zones humides figurent dans les plans régionaux d'actions (jacinthe de Rome) ou dans la déclinaison régionale des Plans nationaux d'action : naïades (moule perlière et grande mulette), l'azuré des mouillères (lépidoptère), la cistude d'Europe et l'émyde lépreuse (reptiles), desman des Pyrénées (mammifère endémique).

Il existe en Occitanie une très grande diversité de types de zones humides : tourbières, prairies humides, zones humides alluviales, roselières, prés salés, fourrés halophiles, landes humides, etc, les prairies humides étant les plus fréquentes (plus de 60 % des cas). Se retrouvent à des fréquences moindres les tourbières, bas-marais et prés para-tourbeux, les forêts alluviales, les mégaphorbiaies et ourlets hygrophiles, les végétations des sources et parois suintantes ou encore les habitats halophiles. La compilation régionale des zones humides a ainsi révélé plus de 250 habitats naturels différents. Ces milieux assurent des fonctions écologiques importantes en étant des éponges naturelles capables de stocker l'eau lors de crues et de la restituer en période sèche, des filtres naturels participant à l'épuration de l'eau, et des lieux de reproduction et de développement de la faune et de la flore aquatique.

La région Occitanie compte actuellement cinq sites [Ramsar](#) : la Camargue (depuis 1966), la petite Camargue fluvio-lacustre (depuis 1996), les étangs de la Narbonnaise (depuis 2006), les étangs palavasiens (depuis 2008) et l'étang de Salses-Leucate (depuis 2017). La labellisation Ramsar est une reconnaissance de l'importance internationale d'une zone humide et vient récompenser la richesse écologique ainsi que les actions de gestion durable engagées depuis plusieurs années par les acteurs locaux. Cependant, ces zones humides constituent un milieu particulièrement vulnérable et soumis depuis plusieurs décennies à de fortes pressions notamment en matière de destruction et dégradation d'habitats. A l'échelle nationale, près de 67 % des zones humides métropolitaines ont disparu depuis le début du XX^e siècle, dont la moitié entre 1960 et 1990. Cette perte d'habitat est principalement liée à l'artificialisation des sols et aux pratiques agricoles, notamment le drainage. Les zones humides sont également affectées par la fragmentation du territoire et la perte de connectivité biolo-

gique, notamment lorsqu'elles sont en lien avec un cours d'eau. Il existe aussi 74 000 km de cours d'eau en Occitanie dont les principaux bassins fluviaux sont ceux du Rhône, de l'Adour, de la Garonne et plus localement de la Loire. Ils offrent des habitats indispensables pour de nombreuses espèces aquatiques animales et végétales, dont quelques espèces rares comme l'euprocte des Pyrénées, ou l'écrevisse à pattes blanches. Certaines espèces endémiques, comme le chabot du Lez, sont d'intérêt majeur. Les zones humides sont également soumises aux effets du changement climatique par la réduction de la pluviométrie et l'assèchement des sols. Les lacs et les tourbières de haute montagne sont particulièrement vulnérables face au changement climatique. Les principaux effets envisagés sur ces milieux sont liés à l'altération des caractéristiques physico-chimiques et biologiques en réponse à des variations de la disponibilité de l'eau et une élévation des températures, celle-ci influant non seulement sur le réchauffement de l'eau mais aussi sur la durée de l'englacement et de la couverture neigeuse. Les changements dans le cycle de gel/dégel auront également des effets sur l'abondance de certaines communautés et sur la composition chimique des eaux (**voir chapitre-enjeu Milieux montagnards**).

À l'inverse, le rôle de ces écosystèmes comme outil d'adaptation ou d'atténuation reste encore mal connu et sous-considéré. Lorsqu'elles ne sont pas dégradées, les zones humides peuvent avoir une fonction d'atténuation des effets du changement climatique en participant à la régulation du climat par la réduction du niveau des émissions de gaz à effet de serre (par exemple la séquestration du carbone par les tourbières, les marais salants). Elles ont également un intérêt pour l'adaptation au changement climatique en protégeant les territoires des inondations, des sécheresses et des tempêtes côtières. Par exemple, les zones inondables intactes contribuent à limiter les risques d'inondation en emmagasinant l'eau en période de crue, puis en la libérant progressivement dans les rivières.



Crédit photo : ARB Occitanie (V. Meslier)

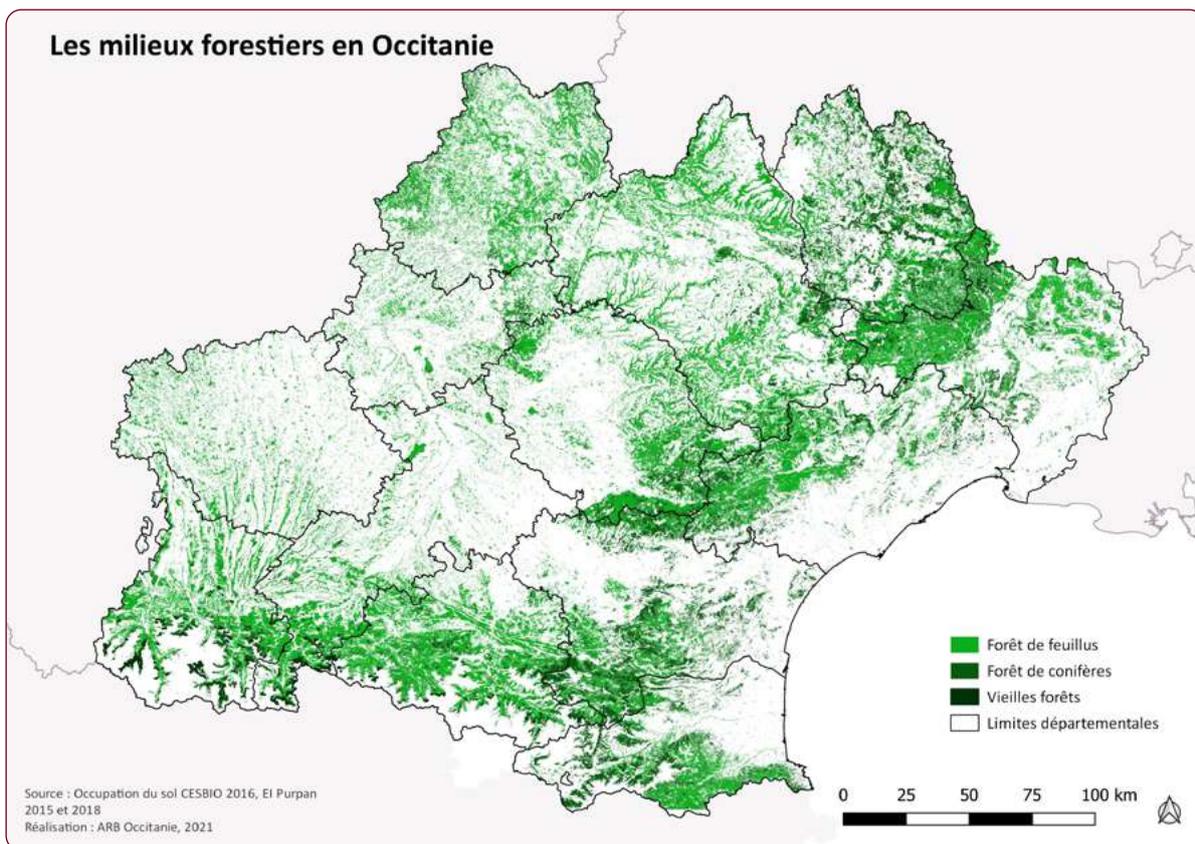


Figure 2.1. Carte de répartition en Occitanie des milieux forestiers.
 (Source : occupation du sol CESBIO, 2016, El Purpan, 2015 et 2018. Réalisation : ARB Occitanie, 2021)

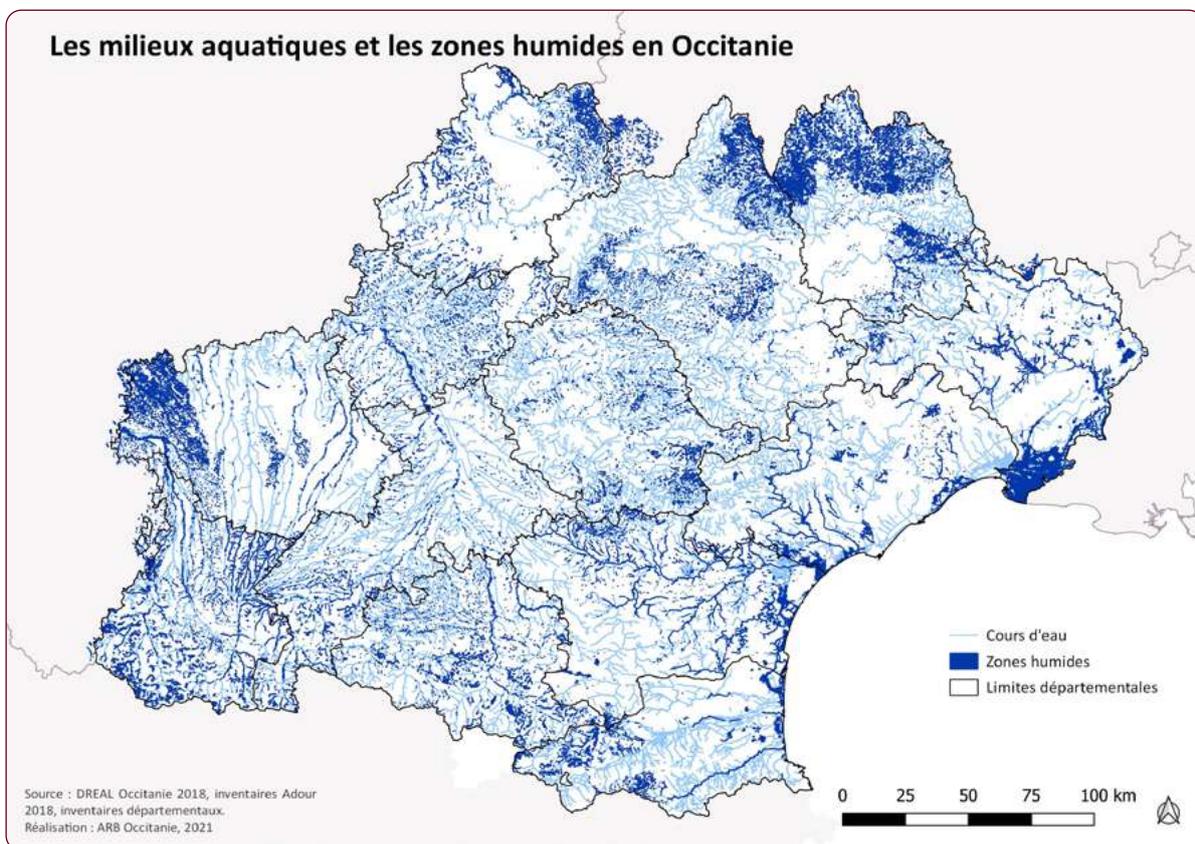


Figure 2.2. Carte de répartition en Occitanie des milieux aquatiques et des zones humides.
 (Source : DREAL Occitanie, 2018, inventaire Adour, 2018, inventaires départementaux. Réalisation : ARB Occitanie, 2021)

Focus milieux secs

Bénédicte GOFFRE (ARB Occitanie)

Les collines méditerranéennes et midi-pyrénéennes sont le domaine des habitats thermophiles, souvent ouverts, hérités de la géologie et des pratiques sylvopastorales séculaires. Les versants arides peu favorables à l'agriculture étaient voués au parcours des troupeaux et à l'exploitation des taillis. La déprise rurale et la dynamique de reconquête par les végétaux ligneux conduit à une fermeture progressive des paysages (Sirami et al., 2010), avec un développement des matorrals arborés dans les zones anciennement parcourues. Ainsi, les pelouses sèches sur sols superficiels (peu profonds) demeurent des habitats remarquables, indispensables à la présence d'espèces à fort enjeu avec côté faune le psammodrome algire, le cochevis de Thékla, ou le scorpion languedocien et l'astragale épineuse (*Astragalus echinatus*) côté flore.

Les milieux secs des plaines et collines midi-pyrénéennes (coteaux de la plaine toulousaine, les coteaux de l'Adour, les petites Pyrénées) révèlent de nombreux enjeux de biodiversité, liés notamment aux influences méditerranéennes (seps strié par exemple dans l'Astarac ou le Pays d'Auch) ou atlantiques (landes sèches à bruyères par exemple dans l'Armagnac). Un [projet](#) d'atlas des milieux secs midi-pyrénéens est en cours de réalisation avec pour ambition de réaliser un état des lieux le plus complet possible de ces espaces : localisation, état de conservation, espèces caractéristiques, mesures de conservation mises en œuvre, etc. Ce travail précisera la connaissance des milieux ouverts et semi-ouverts notamment dans le cadre de la trame verte et bleue. À terme, l'objectif est d'aboutir à un outil de référence pour la conservation de ces milieux.

Le massif des Corbières, les contreforts de Cévennes, les garrigues de Montpellier, ou les costières de Nîmes sont des sites qui conservent des habitats semi-ouverts de très grande qualité (en alternance avec des habitats de culture). Ils trouvent leur prolongement dans les coteaux midi-pyrénéens, où les pelouses sèches abritent des cortèges d'espèces méditerranéennes en limite d'aire de répartition.

En continuité des garrigues de la zone méditerranéenne, les zones d'allure steppique de la région des Grands Causses constituent sans conteste les espaces ouverts les plus emblématiques du Massif central : si elles ne sont pas rares en Occitanie, elles le sont en revanche à l'échelle nationale voire européenne. Elles sont par ailleurs marquées par leur caractère insulaire en terme géologique et donc leur endémisme. Enfin, elles constituent un élément culturel fort du territoire, notamment pour les paysages des Causses et des Cévennes, reconnus au titre des paysages culturels vivants de l'agropastoralisme méditerranéen, et inscrits au patrimoine mondial de l'UNESCO. Ces milieux secs accueillent une mosaïque de pelouses steppiques, de landes et d'affleurements rocheux tout à fait remarquables, dont les corniches et gorges propres au relief caussenard. Dans ce paysage singulier, les pelouses sont composées d'un mélange d'espèces méditerranéennes et d'espèces montagnardes, auxquelles s'adjoignent plusieurs plantes endémiques et des espèces steppiques d'Europe centrale en disjonction d'aires dont la saponaire à feuilles de pâquerette, l'armérie faux-jonc, l'aster des Cévennes, l'ophrys de l'Aveyron et celui d'Aymonin ou la violette des Causses (Bernard, 2009).

Aux Grands Causses de l'Aveyron, de la Lozère, de l'Hérault et du Gard, répondent les causses midi-pyrénéens du Lot et du Tarn-et-Garonne. À l'échelle du grand paysage, les transitions entre les milieux méditerranéens et atlantiques d'une part, et entre les milieux méditerranéens et continentaux d'autre part, se lisent clairement grâce aux mélanges d'espèces d'affinités biogéographiques différentes. L'ensemble de ces milieux secs sont particulièrement fragiles et à dynamique très lente ; cependant ils sont très profondément remaniés par les activités humaines, notamment agricoles. Les milieux qui parviennent à se maintenir sont très souvent fragmentés, enclavés et relictuels, souvent relégués aux espaces délaissés, les moins propices au développement d'activités. Assez négligés dans la classification [Eunis](#) des habitats, il est nécessaire de mieux prendre en compte ces habitats à forts enjeux de biodiversité et de suivre leur réponse aux changements climatiques qui reste encore mal connue.



Crédit photo :
ARB Occitanie

La fonctionnalité écologique de la biodiversité

Bertrand SCHATZ (CNRS - CEFE)

Les écosystèmes procurent de nombreux services appelés services écosystémiques. Certains sont vitaux pour de nombreuses espèces ou groupes d'espèces et sont généralement classés comme des biens communs. Dans ce contexte, la pollinisation est par exemple considérée comme un service de régulation à côté du climat, de la qualité de l'air par exemple. L'avantage de ce concept a été d'identifier les services rendus par la nature à l'homme ; son inconvénient est une vision très anthropocentrée de la nature qui ne considère que ce qui est utile pour l'homme. Dans cette approche, la pollinisation a été parfois cartographiée sur la base d'une valeur de pollinisation pour chaque habitat ; elle a aussi été évaluée financièrement (entre 2,3 et 5,3 milliards d'euros liés la pollinisation en 2010 pour la France sur la base des productions agricoles associées) (Beyou et al., 2016). Cependant, si la pollinisation des plantes cultivées permet une évaluation financière, une telle évaluation en milieu naturel reste impossible au vu de la diversité des espèces et de la difficulté à quantifier le taux de pollinisation des différentes plantes. Le niveau de pollinisation peut être approximé en ne considérant que certaines plantes et l'abondance et la diversité des pollinisateurs ne peuvent être évaluées uniquement que par des échantillonnages locaux identifiés par des experts taxonomistes.

Une nouvelle conception a émergé, suites aux travaux de l'IPBES (IPBES 2016, 2018), qui considère plutôt des Solutions d'adaptation fondées sur la nature (SafN) (**voir focus sur les solutions fondées sur la nature**). Il s'agit non plus d'« utiliser la nature » mais plutôt de « faire avec » vers des objectifs orientés vers une transition écologique pour un monde plus durable. Pour l'exemple de la pollinisation, elle est ici considérée comme un bien naturel fournissant : 1) une alimentation humaine contribuant à la santé humaine (vitamines, éléments minéraux, etc.), 2) une régulation et une contribution au fonctionnement des écosystèmes dont le maintien des plantes sauvages et des paysages associés et 3) une grande diversité d'aspects culturels allant des pratiques apicoles plus ou moins liées à la domestication, des savoirs naturalistes et scientifiques, une éducation à l'environnement, des loisirs, un cadre de vie et des aspects esthétiques paysagers.

Une autre conception plus scientifique considère le fonctionnement des écosystèmes, où la pollinisation assure la conservation des différentes plantes sauvages, mais contribue aussi aux chaînes trophiques notamment l'alimentation des nombreuses espèces insectivores et

l'existence de plusieurs espèces parasites. Cette approche considère la pollinisation au sein d'autres fonctions écologiques comme la séquestration du carbone, les réseaux d'interaction entre espèces, le cycle de l'eau... Ce raisonnement aboutit au concept des trames vertes (trame de milieux naturels des forêts aux milieux ouverts, **figure 2.3**) et bleues (trame liée à l'eau, des rivières aux étendues d'eau), mais aussi turquoise (interface entre les deux précédents), noire (milieux sans éclairage nocturne permettant une continuité écologique pour les espèces nocturnes), brune (trame de continuité des sols), etc. Cette approche permet de considérer et de conserver les zones de présence de la biodiversité (les réservoirs) ainsi que les zones de déplacement de la biodiversité (les corridors). Ainsi une haie bocagère est considérée comme une connexion écologique entre deux zones forestières ou deux prairies naturelles. Cette conception peut être envisagée à une échelle globale, via par exemple le Schéma Régional de Cohérence Ecologique (SRCE) mais aussi à l'échelle plus locale comme dans les Plans Locaux d'Urbanisme (PLU), des communes ou des communautés de communes. Ce SRCE sera aussi une des composantes importantes du futur Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires (SRADDET) d'Occitanie. Dans ces différentes approches, la fonction écologique de pollinisation est particulièrement bien identifiée et reconnue favorisant sa conservation.

Que l'approche soit par services écosystémiques, par SafN ou par fonctions écologiques, ce sont des composantes de la biodiversité également sensibles aux impacts des changements climatiques, à des échelles plus larges de la dynamique écologique des habitats naturels. Les risques correspondent par exemple ici à des perturbations dans la rétention ou la filtration de l'eau par le drainage ou la destruction de zones humides, des incendies forestiers qui annulent la séquestration du carbone sur le long terme, ou à des ruptures de trames écologiques par destruction de haies, de lisières ou par construction d'obstacles dans les cours d'eau. Cette fonctionnalité écologique est aussi menacée par les changements climatiques via les réponses des espèces comme le décalage phénologique entre émergence d'insectes et de floraison causant des ruptures d'interactions de pollinisation, les changements de distribution des espèces qui modifient les trames et les zones réservoirs de biodiversité, ou l'émergence de facteurs limitant qui bloquent les chaînes trophiques et causent aussi des changements de distribution.

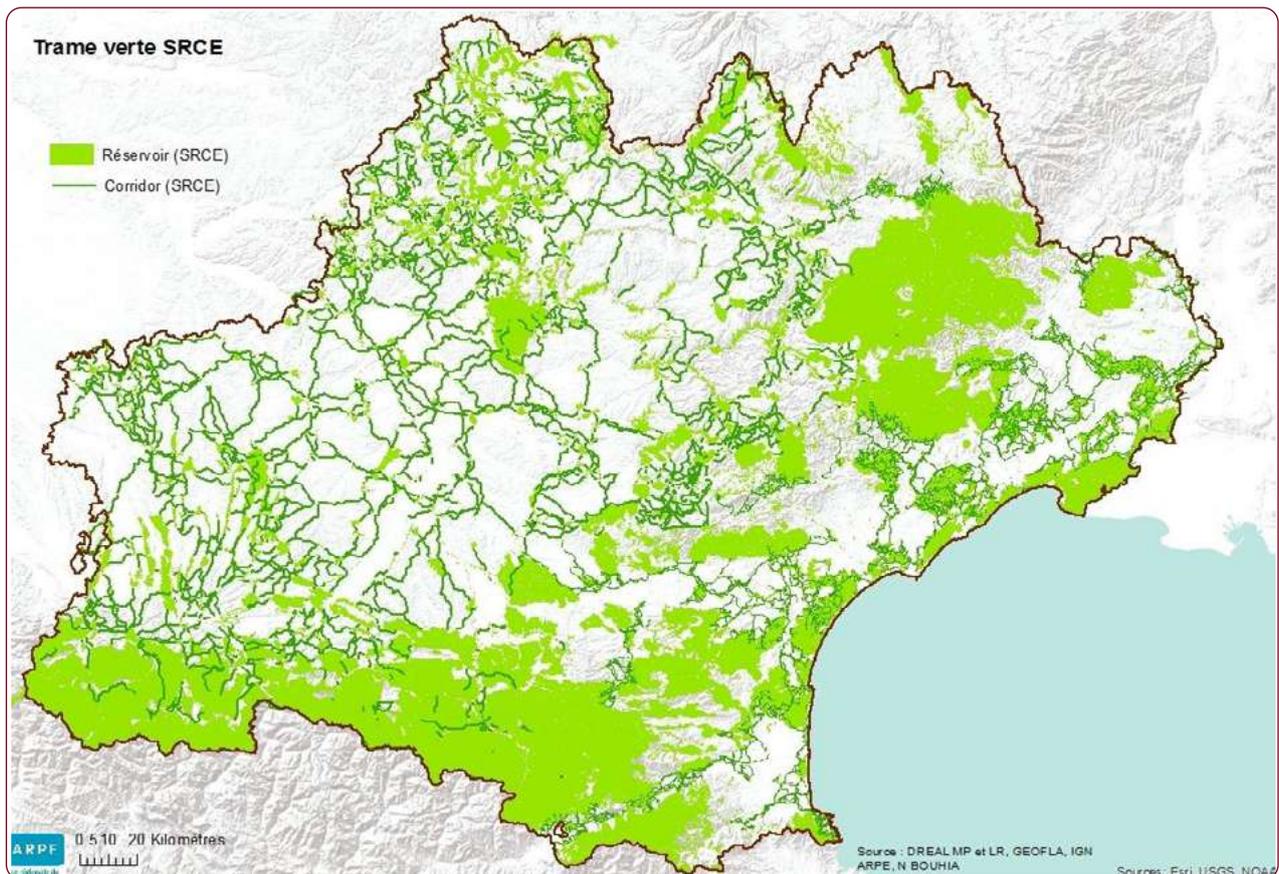


Figure 2.3. Carte du Schéma de Régional de Cohérence Ecologique (SRCE) qui distingue les zones réservoirs de biodiversité et les corridors entre ces réservoirs.
(Source : cartothèque de la démarche H2O 2030, [en ligne.](#))

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Créer une nouvelle forêt capable de résister au changement climatique - 48 et 30

CDC Biodiversité / Centre National de la Propriété Forestière (CNPF)

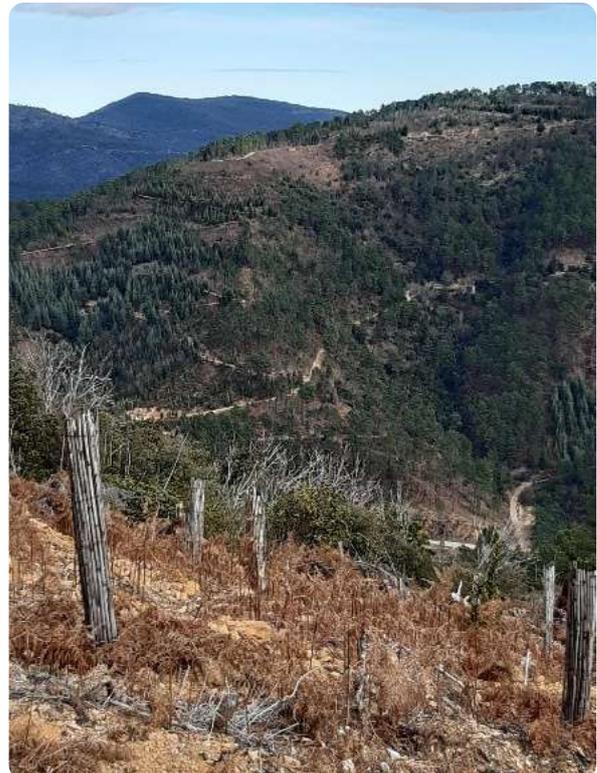
- [En savoir plus](#)

La châtaigneraie cévenole, peuplement emblématique et historique du territoire du Gard et de la Lozère, est aujourd'hui confrontée à des évolutions, notamment climatiques, qui accentuent son dépérissement déjà amorcé du fait de problèmes sanitaires et stationnels (composés du sol, conditions du site, de l'exposition, de la topographie et du climat). L'étude du CNPF (2014) sur l'état sanitaire des châtaigniers forestiers dans le massif cévenol dresse un constat alarmant : plus de 50 % des arbres étudiés sont morts ou en état de dépérissement important.

Le projet, situé à l'interface de plusieurs conditions climatiques, a des ambitions multiples :

- répondre à l'enjeu du dépérissement massif des châtaigneraies cévenoles ;
- trouver des essences adaptées aux évolutions futures pour maintenir le territoire vivant, conserver la qualité paysagère, assurer des productions diversifiées et préserver les fonctionnalités des forêts en place ;
- constituer des essais et des références pour inspirer les propriétaires cévenols et les générations futures.

Cinq sites chez cinq propriétaires forestiers privés ont été retenus pour répondre à ces ambitions pour une surface totale de 23 ha.



Crédit photo : CRPF Occitanie.

PARTIE MENACES LIÉES AUX CHANGEMENTS GLOBAUX

Le thym : une espèce bioindicatrice des changements climatiques

John THOMPSON (CNRS - CEFE), Perrine GAUTHIER (CNRS - CEFE)

En région méditerranéenne, on observe une multitude de modifications de la biodiversité végétale liées aux changements climatiques (Thompson, 2020). Cependant, très peu d'études portent sur la réponse évolutive des espèces confrontées à ces bouleversements. En effet, certaines ne pourraient-elles pas s'adapter au lieu de se déplacer ? Difficile à démontrer car l'adaptation est un processus long et souvent en décalage avec les changements environnementaux (Eterson et Shaw, 2011).

Une espèce emblématique des garrigues du Languedoc, le thym (*Thymus vulgaris*), fournit pourtant un bel exemple d'une telle adaptation en cours d'évolution. Le thym, comme beaucoup de plantes aromatiques méditerranéennes, présente une grande diversité de types chimiques (chénotypes). En plus des formes « phénoliques » classiques à thymol (la plus fréquemment cultivée) ou à carvacrol (caractéristique du « thym de Provence »), il existe des formes « non-phénoliques » à odeurs très différentes de citron (géraniol), de lavande (linalool) ou d'autres essences (alpha-terpénol, cinéole, thuyanol). Ces différences proviennent de modifications génétiques des chaînes de biosynthèse. Cette diversité génétique s'exprime, dans la nature, par une différenciation spatiale le long d'un gradient écologique très abrupt.

Au début des années 1970, une cartographie de la distribution des chénotypes a été réalisée dans 288 stations de thym autour du Pic Saint-Loup et du bassin de Saint-Martin-de-Londres (photo 2.1), au nord de Montpellier. A cette époque 70 % des populations exclusivement phénoliques étaient situées au-dessus de 225 m, dans les zones à hivers doux, sur sols rocaillieux et secs. Au contraire, 88 % des populations exclusivement non phénoliques étaient localisées dans les zones à températures hivernales plus basses sur sols plus profonds en dessous de 200 m.

Sur ce secteur géographique, les différences de gels sont, en effet, liées à une inversion des températures entre le bassin et les crêtes. Nos études expérimentales menées en parallèle avec les études de distribution ont montré que les chénotypes phénoliques sont très sensibles aux forts gels de l'hiver mais très résistants à la sécheresse estivale, alors que les chénotypes non-phénoliques sont très résistants aux gels mais moins tolérants à la sécheresse estivale (Thompson et al., 2007 ; Amiot et al., 2005). Voici un bel exemple d'adaptation à des conditions microclimatiques très localisées.

Ce patron est toutefois en train de changer. Depuis la fin des années 1950, les températures annuelles minimales absolues sont moins extrêmes : aucun gel suffisamment intense pour exclure les chénotypes phénoliques du bassin n'a été enregistré depuis 30 ans (figure 2.4). En 2010, nous avons donc ré-échantillonné 36 des populations étudiées en 1973 : 12 populations « phénoliques », 12 « non-phénoliques » et 12 mixtes. Les résultats obtenus vont tous dans le même sens d'une augmentation des chénotypes phénoliques qui apparaissent dans les populations autrefois non-phénoliques et augmentent en fréquence dans les populations mixtes, dont certaines sont désormais exclusivement phénoliques (figure 2.5) (Thompson et al., 2013).

Avec le relâchement d'une pression de sélection associée aux gels hivernaux, la progression des formes phénoliques témoigne d'une réponse adaptative aux changements climatiques. La distribution de l'espèce n'a pas été modifiée, c'est l'organisation spatiale de son patrimoine génétique qui évolue. Ainsi le thym de nos garrigues s'érige en sentinelle des hivers de plus en plus doux. En perspective : une troisième étude pour mieux cerner la vitesse de l'évolution en cours.



Le bassin de Saint Martin-de-Londres (zone à chénotypes non-phénoliques) et les crêtes rocaillieuses autour du Pic St-Loup (zone à chénotypes phénoliques).
(Crédit photo : John Thompson)

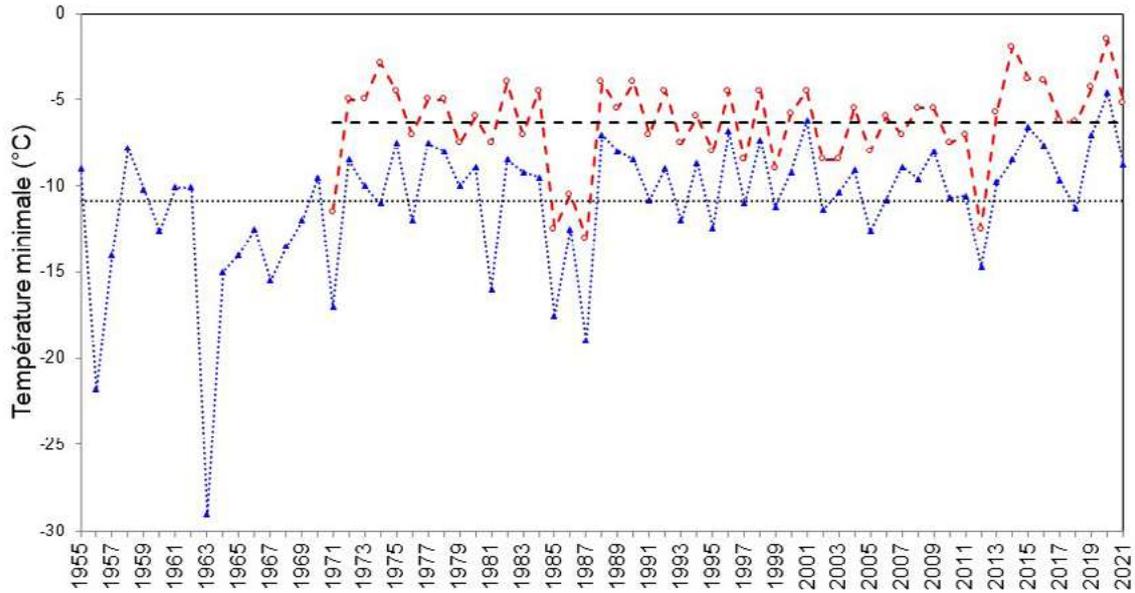


Figure 2.4. Températures minimales annuelles de stations météorologiques dans le bassin de Saint-Martin-de-Londres en bleu (zone non-phénologique) et au nord de Montpellier en rouge (zone phénologique) avec en pointillés les moyennes pour les périodes étudiées dans les deux zones.
(Source : données Météo-France.)

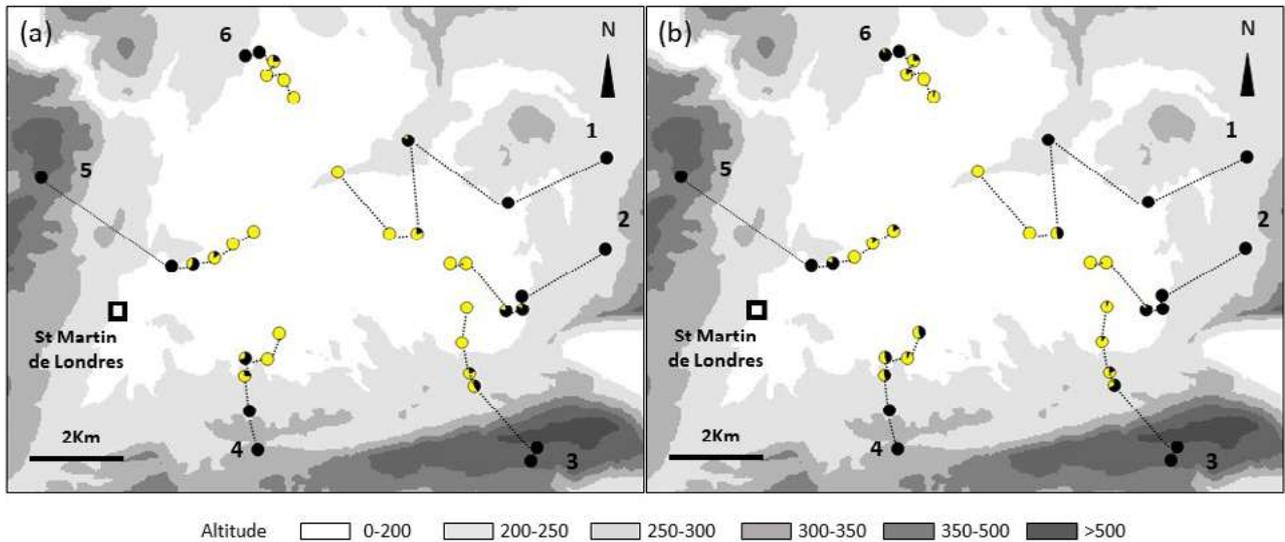


Figure 2.5. Composition chimique de populations de thym localisées sur six transects le long de gradients altitudinaux et écologiques près de Saint-Martin-de-Londres (a) au début des années 1970 avec, sur chaque transect, deux populations non-phénologiques (jaune), deux populations phénologiques (noir) et deux populations mixtes (jaune et noir) et (b) en 2010.
(Source : carte redessinée à partir de données et de la carte originale dans Thompson et al., 2013.)

Diagnostic forestiers et mécanismes de résistance aux perturbations climatiques

Sylvie SABATIER (CIRAD – AMAP), Yves CARAGLIO (CIRAD – AMAP), Éric NICOLINI (CIRAD – AMAP), Christophe DRÉNOU (CNPF - IDF Toulouse)

DiagARCHI : du diagnostic architectural à l'outil embarqué

L'architecture végétale qui permet de décrire et comprendre la construction des végétaux, notamment les arbres, est aussi un formidable moyen d'appréhender la santé d'un individu par l'observation et la prise en compte de critères morphologiques et architecturaux. L'application scientifique DiagArchi est dédiée au diagnostic de l'état des arbres en forêt basé sur une démarche d'arbre de décision. Ce produit comprend des clés ARCHI de détermination développées en étroite collaboration avec l'IDF-CNPF (Drénou et al., 2011). Ces clés correspondent à une séquence de questions qui identifient un état de santé de l'arbre : sain, résilient, descente de cime, repli, stressé, dépérissement irréversible ou mort.

Cet outil embarqué peut (1) faciliter l'accès aux connaissances morphologiques pré-requises pour le diagnostic architectural, (2) donner les critères visuels facilement observables, (3) guider l'observateur dans sa démarche d'observation de l'arbre (niveaux et échelles d'observation dans l'arbre), (4) mémoriser l'historique des questions/réponses de chaque utilisateur, (5) à plus long terme obtenir des scores au niveau du peuplement via l'association d'outils d'analyse des arbres de décisions, (6) une saisie des données directement sur le terrain et (7) harmoniser les notations entre observateurs. Le menu de l'appli DiagArchi comprend aujourd'hui 14 espèces d'arbres (7 feuillus et 7 résineux). Les utilisateurs sont divers : agents du département Santé Forêt, techniciens forestiers CNPF et ONF, chercheurs (INRAE, CIRAD), formateurs, arboristes consultants, parcs naturels, etc. (Drénou, 2012).

De la connaissance du fonctionnement de la plante aux critères de sélection d'espèces

Ces travaux sur la réactivité et le diagnostic des arbres nous ont amenés à étudier les mécanismes au niveau du fonctionnement du méristème et plus particulièrement les interactions entre le climat et la croissance (Drénou

et al., 2013). L'étalement des feuilles et l'allongement des axes est le résultat visible de l'organogénèse, activité cellulaire de la partie apicale des axes (méristème) élaborant le nombre et la taille des feuilles ainsi que les éléments de tige. Ainsi chez le pin d'Alep la pluie automnale détermine la croissance de la pousse printanière à venir, et les conditions climatiques de l'année en cours nous permettent d'anticiper le nombre possible de reprise d'allongement. Chez le peuplier, le nombre de jeunes feuilles préformées à l'automne et présentes dans le bourgeon hivernal seront étalées au printemps suivant, si les conditions de pluie et de température sont favorables, la tige continuera de s'allonger et mettra en place de nouvelles feuilles non présentes dans le bourgeon hivernal, et cela se produira tant que les conditions restent favorables, certaines années jusqu'en été. Il est ainsi possible d'émettre des prédictions de la croissance à venir en fonction de scénarios climatiques.

Ces études permettent de définir des stratégies de croissance via différentes combinaisons de l'allongement et de l'organogénèse :

- mettre en place au cours de l'allongement seulement le stock de feuilles préformées ou aller au-delà, réponse à court terme aux conditions ;
- exprimer une ou plusieurs phases d'allongement dans une année, réponse à moyen terme aux conditions ;
- désynchroniser les phases d'allongement selon les axes de l'individu.

Par exemple, en cas de conditions limitantes, plusieurs phases d'allongement sont exprimées sur le tronc et une seule sur les autres axes, minimisant la dépense d'énergie tout en conservant une compétitivité pour la hauteur (Drénou et Caraglio, 2019).

Dans la problématique actuelle de recherches d'espèces forestières, d'ornement ou fruitières, capables de résister ou s'acclimater aux modifications et accidents climatiques, ces stratégies de réponses aux conditions climatiques sont des critères à considérer pour définir des espèces candidates (figure 2.6).

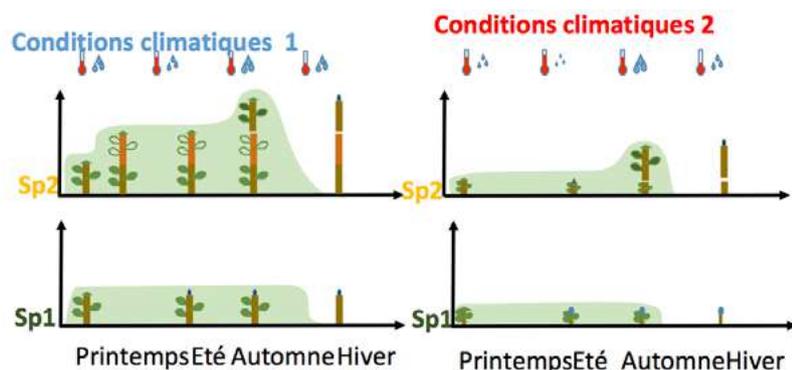


Figure 2.6. Deux expressions de la croissance de deux espèces en fonction de deux scénarios climatiques, un favorable à la croissance (Conditions climatiques 1) et un stressant (Conditions climatiques 2). Une espèce (Sp1) capable de ne faire qu'un seul allongement printanier de feuilles préformées et une espèce (Sp2) capable de faire de la néoformation et d'exprimer plusieurs phases d'allongement dans l'année. En fond vert : surface globale des feuilles mise en place. (Source : Drénou et al., 2012)

Des menaces liées aux changements globaux toujours plus fortes

Bertrand SCHATZ (CNRS - CEFE)

Nous pouvons considérer les changements climatiques sous l'angle de trois composantes : 1) l'augmentation des températures (canicules estivales, périodes enneigées plus courtes et nombres de jours de gel plus faibles) ; 2) la réduction des précipitations annuelles ou saisonnières (augmentation des périodes et des intensités de sécheresse, baisse et irrégularité des débits des cours d'eau) et 3) l'augmentation des événements extrêmes (épisodes orages, tempêtes) marquée par une imprévisibilité croissante (**voir chapitre-enjeu Climat régional**). Plusieurs activités humaines sont pluriséculaires en Occitanie comme la présence de la viticulture sur le littoral, de cultures de céréales dans les plaines du Sud-Ouest et d'élevages dans les zones montagneuses. Après la seconde guerre mondiale, des changements radicaux ont marqué l'agriculture avec bien souvent 1) l'abandon progressif du pâturage qui a déclenché un embroussaillage puis localement un développement forestier et 2) l'arrivée progressive puis l'utilisation aujourd'hui massive des pesticides (surtout en viticulture et arboriculture, mais aussi en cultures céréalières) (**voir focus sur les impacts liés aux pollutions**). Ils ont respectivement conduit à une réduction des espèces de milieux ouverts (Sirami et al., 2010) mais aussi à une diminution forte des insectes et de tous les prédateurs insectivores (Sánchez-Bayo et Wyckhuys, 2019 ; Zattara et Aizen, 2021).

Actuellement, les événements extrêmes même ponctuels sont plus fréquents et intenses, donc avec des impacts forts sur la biodiversité comme les destructions de berges en cas d'inondation (l'Orb dans l'Hérault), de forêts et d'habitats naturels en cas de tempêtes (Portail Occitanie littoral, 2021) ou d'incendies (voir les incendies récents en Occitanie). D'autres effets de ces événements extrêmes sont moins connus comme l'infertilité croissante des grains de pollen au-delà de 40 °C, des mortalités de plantes surtout sur sols peu profonds, mais aussi d'insectes et d'animaux vertébrés en cas d'absence de zones de relative fraîcheur. Plus tard, si la tendance se maintient ou s'aggrave, ces changements climatiques obligeront les espèces à changer leurs aires de distribution ou, pour celles qui restent sur place, à s'adapter aux nouvelles conditions environnementales. Dans ces conditions, changer d'aire de distribution signifie remonter vers le nord ou en altitude pour retrouver des conditions climatiques favorables (oiseaux, insectes, plantes, etc.).

Mais ce n'est pas toujours possible, comme par exemple l'ophrys d'Aymonin endémique des plateaux calcaires des Grands Causses qui ne pourra pas retrouver cette même nature de sol plus au nord. Pour les espèces qui remontent en altitude, la surface de leur zone de présence sera fortement réduite avec un risque fort d'isolement sur certaines montagnes qui s'accompagne d'une réduction de leurs échanges génétiques comme c'est

le cas pour les trois lézards endémiques pyrénéens, et pour le papillon apollon qui disparaît progressivement des massifs de faibles altitudes notamment dans le Massif central. Les suivis à long terme d'espèces sont cruciaux pour documenter l'impact des changements climatiques : par exemple le suivi depuis 30 ans dans le Parc national des Cévennes du lézard vivipare qui a avancé sa date de ponte (jusqu'à un mois), augmenté le nombre d'œufs pondus et réduit la durée de sa survie adulte et pour qui une altitude de 1100 m est pour l'instant la limite au-dessus de laquelle les populations ont un bilan démographique positif.

La possibilité de réaction des espèces face à ces changements climatiques dépend directement de leur temps de génération. Ainsi, les plantes annuelles peuvent s'adapter rapidement aux contraintes climatiques, alors que les arbres (**voir focus milieux forestiers**) au temps de génération de plusieurs dizaines d'années sont beaucoup moins réactifs. De plus, les espèces inféodées aux milieux humides sont particulièrement ciblées par la réduction globale de la ressource en eau. De nombreuses espèces montrent ainsi des décalages phénologiques, comme par exemple des périodes de floraisons plus précoces pour les plantes, ou des périodes d'émergence d'insectes encore plus précoces et parfois plus courtes. Cela occasionne de nouvelles menaces concernant les interactions entre espèces comme par exemple la nécessité pour les mésanges d'avancer leur date de ponte pour se synchroniser à la période d'émergence des chenilles dont elles nourrissent leurs petits.

Les nombreuses espèces insectivores (oiseaux, chauves-souris, etc.) doivent s'adapter aux nouvelles périodes d'abondances de leurs proies. Il existe ainsi un phénomène global d'homogénéisation des espèces et des communautés d'espèces (IPBES, 2018 ; MedECC, 2020), avec une diminution progressive des espèces spécialisées pour certains habitats ou dans leurs interactions, ou ayant un cycle biologique complexe ou exigeant ; de leur côté, les espèces généralistes et flexibles dans leur alimentation ou leur préférence d'habitat sont favorisées. Les écosystèmes se simplifient et les espèces se banalisent.



L'abeille sauvage *Megachile lagopoda*, spécialisée sur les chardons à floraison estivale, vit à partir de 800 m d'altitude. Elle est menacée à la fois par la hausse de température et la destruction de sa ressource florale. (Crédit photo : D. Genoud)

Vers une intensification et une extension de l'activité des incendies dans la zone Méditerranéenne

François PIMONT (INRAE - URFM), Hélène FARGEON (MAA - DGPE), Julien RUFFAULT (INRAE - URFM), Thomas OPITZ (INRAE - BIOSP), Renaud BARBERO (INRAE - RECOVER), Nicolas MARTIN-St-PAUL (INRAE - URFM), Éric RIGOLOT (INRAE - URFM), Jean-Luc DUPUY (INRAE - URFM)

Le changement climatique augmente le danger incendie dans de nombreuses régions du monde, en asséchant davantage le combustible au cours de la saison des feux. La composante météorologique du danger d'incendie est classiquement mesurée à partir de l'Indice Forêt Météo (IFM) : plus il est élevé, plus les conditions météo sont favorables à l'éclosion et à la propagation des feux. Une manière simple d'aborder les effets du changement climatique sur le risque lié aux incendies consiste donc à simuler l'évolution de l'IFM à partir de projections climatiques (Fargeon et al., 2020).

Cette approche montre une intensification du danger dans la partie méditerranéenne de l'Occitanie, qui s'explique par l'augmentation des températures, unanimement prédite par les modèles climatiques. Elle montre également une extension de la zone de danger vers l'ouest et le nord. Cependant, cette approche fondée sur l'IFM présente une importante limitation, car cet indice s'avère fortement biaisé spatialement et temporellement, lorsqu'on le compare aux observations réelles d'incendies. Ainsi, la traduction de l'augmentation future du danger en termes d'évolution des incendies n'est pas évidente.

Une manière d'affiner les projections consiste à utiliser les prédictions d'un modèle qui simule l'activité des incendies sur une zone donnée. Ici, nous projetons sur la partie méditerranéenne de la région Occitanie les prédictions du modèle Firelihood, un modèle probabiliste simulant les nombres et surfaces quotidiennes des feux estivaux dans des pixels de 8 km. Les variables explicatives du modèle sont l'IFM, la surface combustible, la période de l'année, ainsi que des facteurs de correction spatiale (Pimont et al., 2021). Ce modèle a été ajusté sur la zone dite « Prométhée » (opération de suivi sur les incendies de forêts de 15 départements du Sud Est) qui dispose d'une base de données fiables recensant les incendies. Les travaux de projections réalisés à partir de Firelihood ont montré que si le nombre de feux de 1 ha répondait aux variations du climat dans les mêmes proportions que l'IFM, le nombre de grands feux (> 100 ha) et les surfaces brûlées présenteraient des augmentations 2 à 3 fois plus importantes, confirmant ainsi les limites liées à l'usage de l'IFM moyen pour des projections (Fargeon, 2019).

La **figure 2.7** montre les augmentations de surfaces brûlées prédites par Firelihood entre la période récente (2000-2019) et la fin de XXI^e siècle (2079-2098). Ces va-

leurs ont été obtenues pour le scénario RCP8.5 (c.-à-d. sans réduction importante des émissions) en faisant la moyenne de cinq modèles climatiques contrastés (Fargeon, 2019). Pour ces cinq départements, cette augmentation de surface brûlée s'accélère à partir de 2060 pour atteindre +124 % à la fin du siècle. On notera cependant que ces projections dépendent fortement du modèle climatique utilisé, puisqu'elles varient entre +37,5 % pour le modèle CNRM et +177 % pour le modèle HADGEM. Enfin, les projections réalisées selon le scénario RCP4.5 suggèrent une augmentation nettement moins prononcée des surfaces brûlées (+54,5 %), ce qui rappelle l'importance de la réduction des émissions pour limiter les effets du changement climatique.



Incendie de Grabels (34), 13 sept 2007, qui illustre la proximité des feux avec les habitations humaines. (Crédit photo : E. Rigolot INRAE).

Les résultats précédents supposent que la relation entre activité des incendies et météorologie modélisée par Firelihood demeure constante dans le futur. Cette hypothèse est sujette à caution, car la mortalité de la végétation due à la sécheresse devrait fortement s'accroître, modifiant profondément le combustible. Des incertitudes importantes existent également concernant l'évolution des activités humaines, qu'il s'agisse de l'usage des sols ou des mesures de prévention et de lutte. Ces facteurs, qui pourraient amplifier ou atténuer les augmentations projetées, constituent une source d'incertitude supplémentaire. En conclusion, malgré les incertitudes liées au climat (modèle climatique), au scénario (RCP8.5 ou 4.5), et à la relation feu - climat, le risque incendies de forêts devrait s'étendre singulièrement vers l'arrière-pays et les zones de montagne et s'intensifier dans les plaines agricoles.

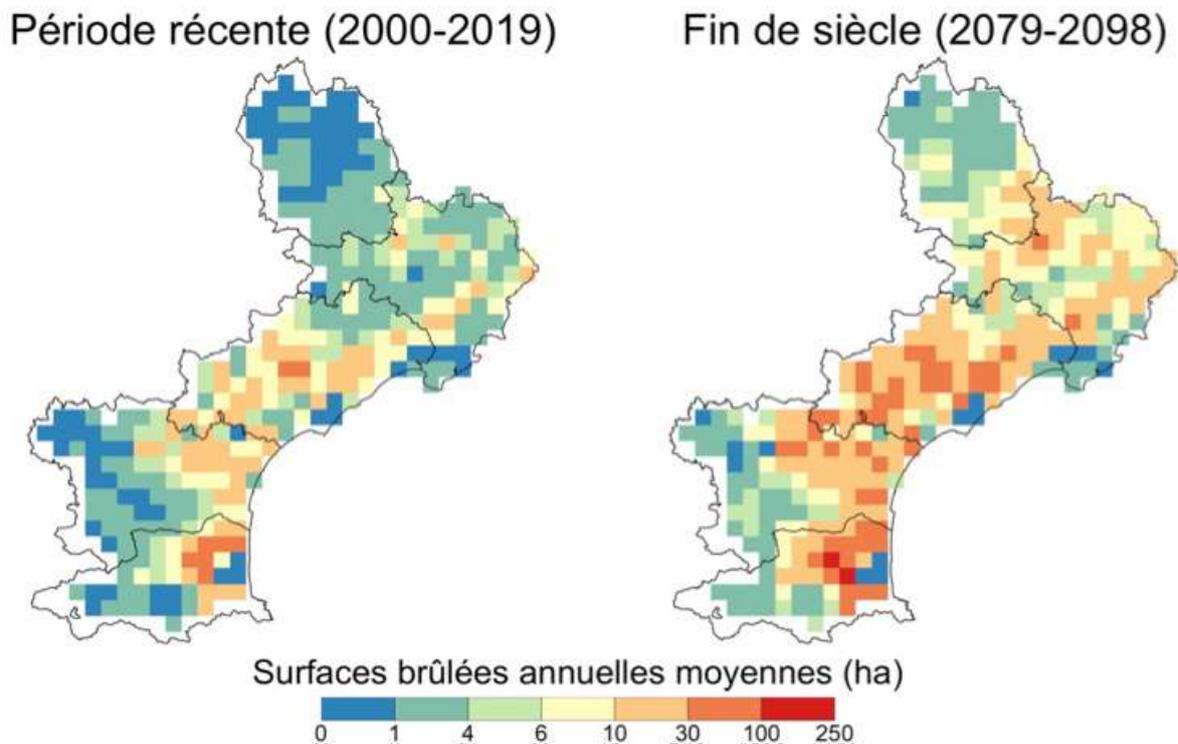


Figure 2.7. Comparaison entre les surfaces brûlées prédites par le modèle Firelihood pour les périodes 2000-2019 et 2079-2098 sur les 5 départements méditerranéens d'Occitanie (5 modèles climatiques, scénario sans réduction d'émissions - RCP8.5). On note une forte extension de la zone à risque dans l'arrière-pays méditerranéen ainsi que dans les plaines agricoles.

(Source : Pimont et al., illustration préparée pour le CROCC_2021)

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Restaurer la zone humide du Castagné pour accroître la résilience du territoire - 46

Syndicat Mixte Dordogne moyenne et Cère aval - [En savoir plus](#)

La zone humide du Castagné (environ 7 ha), située à la confluence de 3 ruisseaux, est fortement dégradée (drainage, recalibrage). Dans le cadre d'un plan de gestion de 5 ans, des travaux de suppression du drainage, la mise en place d'un pâturage extensif et un suivi fin de l'évolution de la zone (hydrologie, faune, flore) ont été réalisés.

Les premiers résultats montrent une nette amélioration du caractère hydrophile du site et une remontée du toit de la nappe qui se maintient en hiver et une partie du printemps, ce qui n'était pas le cas auparavant. La restauration des fonctionnalités de cette zone humide participe à la résilience du territoire face aux effets du changement climatique : atténuation des crues, soutien d'étiage, réservoir de biodiversité, épuration des eaux, stockage du carbone, maintien des usages liés aux activités humaines (eau potable, baignade...) et agricoles (fourrage, abreuvement...).



Crédit photo : adasea.d'Oc.

projet qui s'inscrit dans
une logique de
SdRN

Le grand tétras (*Tetrao urogallus*) se reproduit de plus en plus tôt, des Pyrénées à la Norvège

Emmanuel MÉNONI (OFB - DRAS)

Texte co-écrit avec Joy COPPES (FVA Wildtierinstitut Arbeitsbereich Waldvögel), Robert MOSS (Station House, Écosse), Per WEGGE (Norwegian University of Life Sciences)

Étant donné que nos zones d'études s'échelonnent le long d'un fort gradient latitudinal, du 42° au 60° parallèle, et que le glissement phénologique observé n'est pas homogène, mais plus lent aux latitudes extrêmes qu'aux latitudes intermédiaires, nous discuterons de l'effet de la latitude sur cet effet des changements climatiques sur le sort des populations de grand tétras d'Europe du Nord, d'Europe moyenne et des Pyrénées. En nous appuyant sur des données déjà publiées relatives à la dynamique des populations et au succès reproducteur (Moss et Oswald, 2001 ; Wegge et Rolstad, 2017), nous rechercherons les conséquences biologiques possibles de ce phénomène sur le sort des populations de grand tétras, dont la population pyrénéenne, une des plus méridionales du monde.

Le grand tétras est une espèce parapluie en régression et sous surveillance étroite dans tous les pays de son aire de répartition, qui s'étend de l'Espagne à la Sibérie centrale. C'est un bon indicateur de l'état de ses habitats, les forêts boréales, et sous des latitudes moins élevées, les forêts de montagne. Cet oiseau se reproduit selon un mode particulier, la constitution d'arènes ou leks, sur lesquels les mâles établissent une hiérarchie en s'accaparant de petits territoires symboliques. Les femelles visitent ces leks sur une courte période lorsqu'elles sont fécondables, pour s'accoupler. Le suivi des populations s'appuie entre autre sur le dénombrement des mâles sur les leks, durant lesquels on note la présence de femelles actives et disponibles pour l'accouplement. Différentes équipes européennes ont notées que la visite des femelles sur les leks était de plus en plus précoce, de même que les accouplements. Nous avons mesuré le glissement en précocité de la période de la reproduction dans sept zones d'études suivies depuis plusieurs décennies : sud de la Norvège, centre-est de l'Écosse, Forêt Noire, Vosges, Jura, Pyrénées centrales françaises (Ménoni et al., 2020) et Pyrénées catalanes espagnoles.

On note une avancée significative des accouplements dans toutes ces populations, mais pas à la même vitesse. La vitesse du déplacement du pic de reproduction est la plus rapide dans la Forêt Noire (-0,54 jours/an) suivie des Vosges (-0,45 jours/an), du Jura (-0,42 jours/an), de l'Écosse (-0,33 jours/an), des Pyrénées centrales françaises (-0,28 jours/an), des Pyrénées espagnoles (-0,13 jours/an) et enfin du sud norvégien (-0,12 jours/an) (figure 2.8).

On s'attend à ce que la phénologie de la végétation détermine le moment de la période de reproduction ; toutefois, des données phénologiques détaillées ne sont pas disponibles pour toutes les zones d'étude. Les conditions météorologiques affectent la phénologie de la végétation, c'est pourquoi nous nous concentrons sur la variation annuelle et les changements des conditions météorologiques printanières. Des données météorologiques à haute résolution sont disponibles pour toutes les zones d'étude, par exemple via les bases Chelsa ou Worldclim. Ces ensembles de données météorologiques comprennent également des prévisions pour l'avenir. Étant donné que nos zones d'études s'échelonnent le long d'un fort gradient latitudinal, du 42° au 60° parallèle, et que le glissement phénologique observé n'est pas homogène, mais plus lent aux latitudes extrêmes qu'aux latitudes intermédiaires, nous discuterons de l'effet de la latitude sur cet effet des changements climatiques sur le sort des populations de grand tétras d'Europe du nord, d'Europe moyenne et des Pyrénées. En nous appuyant sur des données déjà publiées relatives à la dynamique des populations et au succès reproducteur (Moss et Oswald, 2001 ; Wegge et Rolstad, 2017), nous rechercherons les conséquences biologiques possibles de ce phénomène sur le sort des populations de grand tétras, dont la population pyrénéenne, une des plus méridionale du monde.

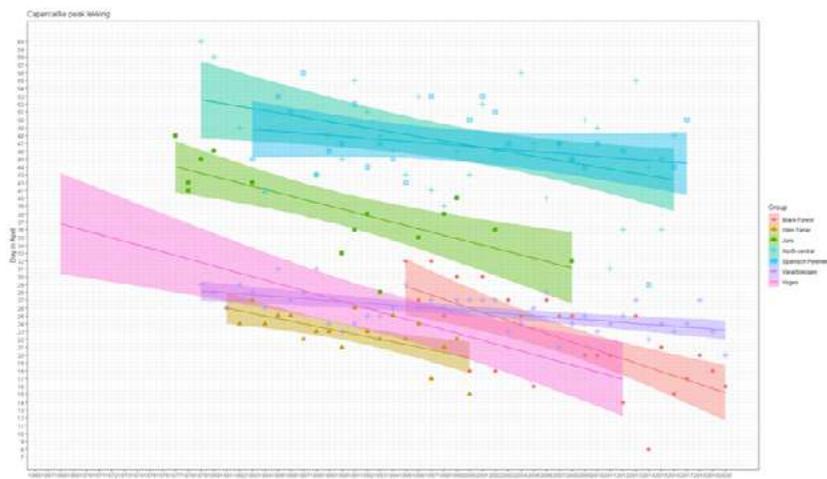


Figure 2.8. Variations du pic de reproduction du grand tétras durant les 40 dernières années dans sept zones d'études allant de la Norvège aux Pyrénées espagnoles. Les Pyrénées françaises sont en bleu-vert (North Central). (Source : voir auteur de la contribution)

No future pour la centaurée de la Clape ?

Éric IMBERT (UM - ISEM)

Depuis 1994, un suivi individu-centré est réalisé sur la centaurée de la Clape (*Centaurea corymbosa*), espèce végétale endémique du massif de la Clape, situé à côté de Narbonne. Les données récoltées ont permis d'associer les transitions démographiques (survie, reproduction...) avec les conditions climatiques, en utilisant les données de la station INRAE de Pech Rouge. Ainsi, chaque matrice de transition peut être associée à des conditions de température (figure 2.9. Panneau de gauche) ou de sécheresse (figure 2.9. Panneau de droite) normales ou extrêmes (moyenne ± 1 écart-type).

Dans les conditions actuelles (la courbe bleue, fréquence des événements extrêmes q^* , correspond aux observations sur la période 1994-2016), la probabilité d'extinction résulte en partie de la stochasticité démographique. Si la fréquence des événements extrêmes augmente (variation du paramètre q), la probabilité d'extinction augmente et atteint la valeur seuil de 1 plus rapidement. Le scénario d'augmentation des températures (à gauche) a plus d'effet que celui d'augmentation de la sécheresse (à droite). Selon les modèles de prévision climatique sous les conditions RCP4.5, il est attendu des valeurs de $q=0,78$ pour la température et $q=0,15$ pour la sécheresse pour l'horizon 2099. Ce travail montre la sensibilité des espèces méditerranéennes aux changements climatiques et illustre l'importance de l'acquisition des séries temporelles sur le long terme pour la compréhension des systèmes biologiques.



Plante en fleurs de *Centaurea corymbosa*.
(Crédit photo : É. Imbert)

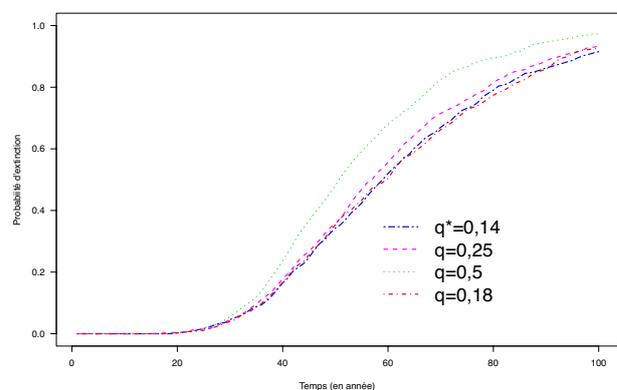
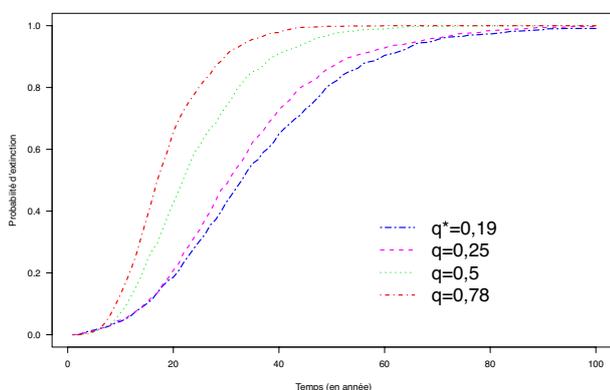


Figure 2.9. Probabilité d'extinction d'une population de centaurée de la Clape en fonction de la fréquence des années chaudes (panneau de gauche) ou du nombre annuel de jours de pluie (panneau de droite). Le modèle a été calibré en prenant en compte les paramètres de la plus grande des 6 populations de *Centaurea corymbosa*. Des résultats similaires sont obtenus pour les autres populations.

(Source : Imbert, 2021)

Focus sur les impacts liés aux pollutions

Bertrand SCHATZ (CNRS - CEFE)

Parmi les impacts aggravants des changements climatiques, la pollution généralisée de l'air, de l'eau et des sols fragilise la biodiversité. Les pollutions des sols et des eaux se situent à des niveaux préoccupants de contamination en Occitanie ; elles sont d'origines agricole, industrielle et urbaine. Concernant l'agriculture, l'Occitanie est la première région viticole (surtout en bordure littorale, mais aussi au nord-ouest du Gers, de la vallée du Lot, du Frontonnais et du Gaillacois), la deuxième en grandes cultures céréalières (blé et maïs principalement mais aussi divers oléagineux, surtout dans le Gers, la plaine toulousaine et le Lauragais) et la deuxième en arboriculture fruitière sur des zones très localisées (vallée de la Garonne dans le Tarn et Garonne, vallée du Têt dans les Pyrénées-Orientales et vallée de la Dordogne dans le Lot, littoral Gard-Hérault).

Malheureusement, ces trois cultures sont très consommatrices de pesticides. Selon les informations de la Banque Nationale des Données de Ventes des Distributeurs (BNV-D), près de 12 225 tonnes de substances actives (produits phytosanitaires) ont été vendues en Occitanie en 2018, c'est-à-dire 4 kg de substance active par hectare de SAU (moyenne française : 3 kg/ha de SAU) (BNV-D, 2020). Les ventes concernent surtout des fongicides et à un moindre degré des herbicides, alors que le lindane (perturbateur endocrinien notable) reste encore très présent malgré son interdiction depuis 1998. Les disparités départementales de vente de substances actives sont assez fortes, avec les trois premiers départements qui se situent à 4 ou 5 fois la valeur de la moyenne nationale alors que sept autres départements sont sous cette moyenne, parfois assez nettement.

Les régions d'élevage et/ou d'espaces (semi-)naturels sont épargnées par cette contamination aux pesticides, alors que les zones de viticulture et d'arboriculture sont associées à des niveaux fort à très forts (ATMO Occitanie, 2019). Le Gard, l'Hérault et le Gers sont parmi les départements français les plus consommateurs de pesticides en 2017 (respectivement 6^e, 9^e et 15^e). Cette pollution agricole est une menace forte pour les insectes en général, et les pollinisateurs sauvages en particulier ainsi que toutes les espèces insectivores. Une des solutions est l'agriculture biologique dont l'émergence est très forte en Occitanie, qui est la 1^{re} région bio de France et la 4^e région bio Européenne (DRAAF Occitanie, 2021). L'Occitanie souffre aussi d'une forte contamination des sols au cuivre du fait de la viticulture et de l'arboriculture (au-delà des normes de traitement des boues en stations d'épuration). La transition écologique de l'agriculture est ainsi fortement attendue.

La pollution de l'air est aussi très préoccupante en Occitanie, du fait de son climat et des afflux touristiques estivaux. Les pics de pollution à l'ozone sont connus pour leur effet toxique sur la biodiversité, et leurs impacts négatifs sur les interactions de pollinisation ont été récemment démontrés (par modification des odeurs florales ; Conchou et al., 2019 ; Vanderplanck et al., 2021). Les dépôts atmosphériques d'azote sur les sols (eutrophisation) impactent aussi fortement les écosystèmes et la biodiversité, en appauvrissant par exemple la diversité biologique des milieux marins ou des prairies, et pourraient aussi impacter les milieux méditerranéens et certaines forêts de montagne. Une exception : les émissions d'oxydes d'azote dues aux transports en Occitanie sont en diminution. Des efforts collectifs (covoiturage, réduction des déchets) se développent également afin de réduire l'origine de quelques pollutions.

Les pollutions localisées issues d'anciens sites miniers, ou de tannerie et de raffineries (plus de 300 sites selon la base de données BASOL, et celles issues des friches militaires, commerciales ou urbaines) représentent aussi un maillage de menaces locales pour la biodiversité entre autres par des pollutions aux métaux lourds (à des doses parfois très fortes). Les solutions de dépollution sont souvent très coûteuses, et encore peu mises en œuvre, mais permettraient une reconquête du foncier. Des solutions de phytoremédiation, donc de dépollution par des plantes accumulatrices de métaux lourds, sont étudiées sur le site de St-Laurent-le-Minier, dans le Gard.

Il ne faut pas oublier la pollution marine, la mer Méditerranée étant l'une des plus polluées au monde. La concentration de plastique y est quatre fois plus élevée que dans « l'île de plastique » du Pacifique Nord, qui s'explique par une production et une consommation excessive de produits plastiques, une mauvaise gestion des déchets ainsi que le tourisme de masse. Des fragments de plastique ont été retrouvés dans toutes les tortues marines en Méditerranée et dans 90 % des oiseaux marins dans le monde (ce taux de seulement 5 % en 1960). D'autres formes de pollutions sont également observées dans les zones portuaires, d'origine industrielle ou liées aux hydrocarbures et aux eaux de ballast des navires marchands.

Enfin, d'autres formes de pollution existent aussi comme des pollutions lumineuses par éclairage nocturne, des pollutions sonores, des pollutions visuelles (publicités inutiles), des pollutions allergènes. En Occitanie, le Parc national des Cévennes s'est particulièrement distingué sur ce point en devenant un des 13 sites mondiaux avec le label RICE récompensant la démarche collective pour un ciel étoilé.

Focus sur les fortes urbanisation et artificialisation en Occitanie

Bertrand SCHATZ (CNRS - CEFE)

L'urbanisation (en tant qu'augmentation surfacique dédiée aux habitations et à leurs réseaux de dessertes) est consommatrice d'espaces aux abords des villes. Elle est associée à une pollution généralisée (sol, air, eau), à une pollution sonore et à la production d'éclairage nocturne. L'artificialisation est plus globale car elle englobe la création d'espaces commerciaux et industriels, de routes, de ZAC et d'aménagements divers ; elle est ainsi très consommatrice d'espaces naturels et créatrice de fragmentation entre les milieux naturels. Entre 1990 et 2018 en Occitanie, la surface des sols artificialisés a augmenté de 52 %, alors que celle des milieux naturels a diminué de 8 %, celle des zones humides de 3 %, et celles des forêts et des terres agricoles de chacune 2 % (figure 2.10). Cette artificialisation globale induit des îlots de chaleur et complique la gestion urbaine de l'eau (imperméabilisation, inondation, mauvais écoulements) alors que la récupération des eaux de pluies pourrait être source de résilience (voir chapitre-enjeu Milieux urbanisés et chapitre-enjeu Eau).

Le nombre d'habitants en Occitanie a augmenté de plus de 45 000 par an entre 2011 et 2017, avec deux tiers des communes régionales ayant doublé leur densité de population dans les 50 dernières années. Même si la densité de population est de 81,5 habitants/ km² en 2020, bien en deçà de la moyenne nationale (119,3 habitants/ km²), l'Occitanie est ainsi la deuxième région de France métropolitaine possédant la plus forte croissance démographique après la Corse. Il faut distinguer l'état des lieux avec une forte présence humaine sur le littoral et en région toulousaine, et l'évolution récente surtout autour de Toulouse et de Montpellier (et dans une moindre mesure autour de Perpignan et sur le littoral Gardois), donc avec de profondes disparités entre les territoires (figure 2.11). Cette artificialisation est plus importante dans les départements à faible densité de population ; ainsi la surface artificialisée (liée à l'habitat) pour chaque nouveau ménage varie de 292 m² dans l'Hérault à 3267 m² en Lozère ou 3599 m² dans le Gers. Entre 2009 et 2018, 33 millions de m² ont été artificialisés en moyenne chaque année en Occitanie, avec une forte progression sur les 2 dernières années disponibles (2016 et 2017). L'Occitanie est ainsi dans le trio de tête des régions (derrière la Nouvelle Aquitaine, et avec des valeurs similaires à Auvergne-Rhône Alpes) ayant le plus fort rythme d'artificialisation (DREAL Occitanie, 2020).

Il est clair que cette forte consommation d'espace correspond à autant de surfaces en moins pour les milieux naturels et la biodiversité mais aussi à une propagation

diffuse des impacts aux abords des villes et des zones artificialisées ainsi qu'à une réduction croissante de la surface des espaces (semi)-naturels (Vogt-Schilb et al., 2018). Toutes ces modifications perturbent considérablement la biodiversité locale, comme par exemple l'impact de l'éclairage nocturne sur les insectes nocturnes et les chiroptères, mais aussi sur la flore locale. Certaines perturbations apparaissent irréversibles ou du moins présentent des impacts à long terme, mais plusieurs de ces impacts pourraient être mieux contrôlés.

L'impact sur le littoral est particulièrement élevé, notamment en période estivale avec une activité touristique à forte présence humaine. Elle se traduit par de forts dérangements d'espèces animales, et des dégradations voire des destructions de flore et d'habitats naturels (voir chapitre-enjeu Milieux littoraux). Plusieurs espèces animales et végétales colonisent les villes, mais il s'agit surtout d'espèces très flexibles et généralistes dans leurs exigences écologiques. Par l'émergence de l'écologie urbaine, les cas d'adaptation au milieu urbain sont mieux étudiés. Ainsi, certaines plantes peuvent modifier en quelques générations leur type de graines pour s'adapter au milieu urbain (Cheptou et al., 2008), alors que certains oiseaux profitent des sources de chaleur urbaine pour mieux résister à l'hiver (Blondel, 2015).

Avec les outils de planification urbaine, les collectivités territoriales ont un rôle central à jouer dans la lutte contre la consommation et la fragmentation d'espace ; le BTP pourrait aussi favoriser les techniques permettant de rendre les constructions plus accueillantes pour la biodiversité, la création et l'intégration systématique d'îlots de fraîcheur. Le récent phénomène d'exode urbain (après les épisodes de confinement) aurait tendance à diffuser cette urbanisation dans les bourgades proches des villes. Rappelons ici le défi n°1 de la Stratégie régionale de la biodiversité : réussir le « zéro artificialisation nette » à l'échelle régionale à l'horizon 2040. Le code de l'environnement encadre également les projets d'aménagement du territoire en imposant la séquence éviter-réduire-compenser qui permet d'atténuer et de compenser les impacts sur les espèces protégées, les habitats et les fonctions écologiques. Dans ce contexte, des translocations d'espèces végétales et animales peuvent permettre de sauver certaines populations impactées (voir texte sur la centaurée de la Clape) ; d'autres translocations dites assistées permettent de sauver des populations en anticipant les menaces environnementales.

Aller plus loin :

- Stratégie régionale pour la biodiversité - [diagnostics](#).

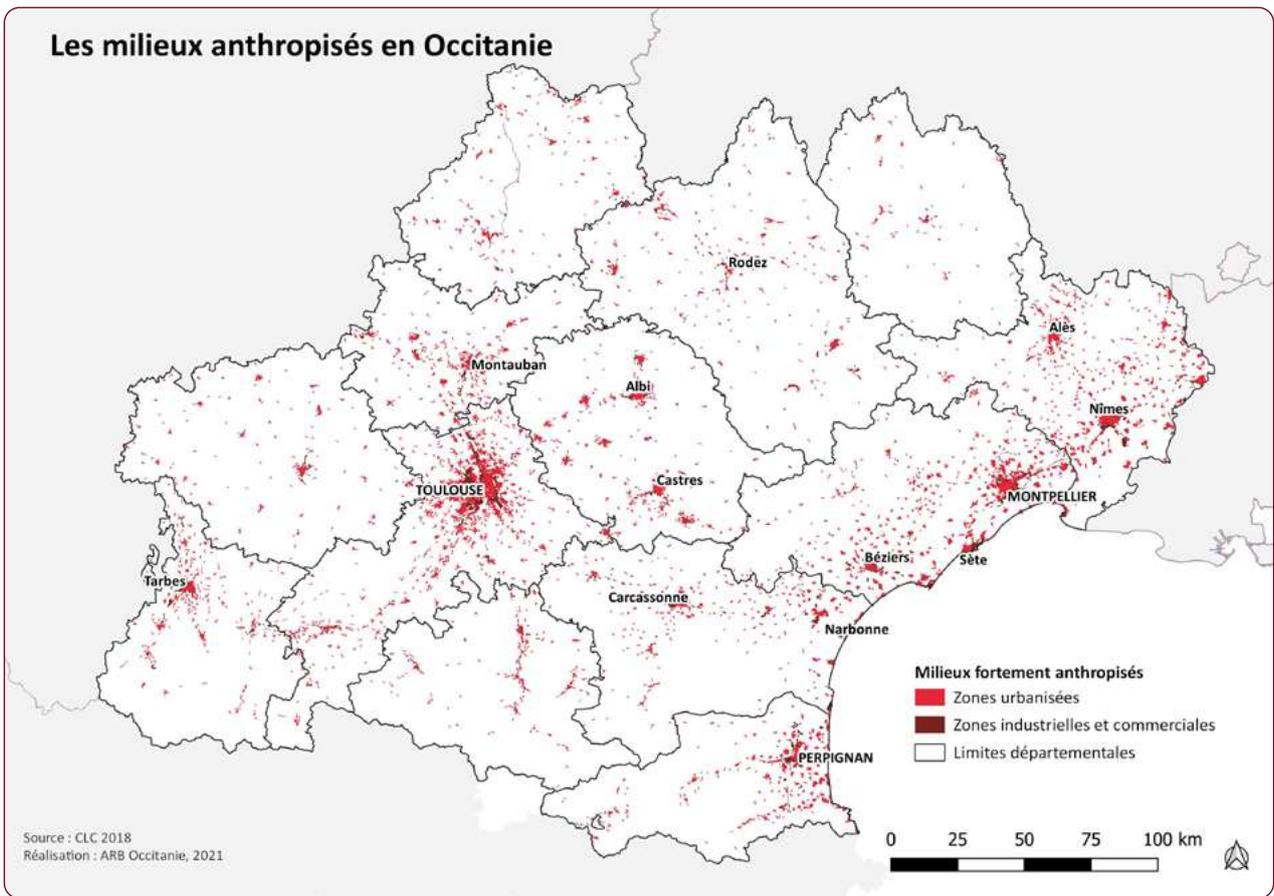


Figure 2.10. Carte de répartition en Occitanie des milieux anthropisés, distinguant les zones urbanisées et celles industrielles ou commerciales.
(Réalisation : ARB Occitanie, 2021)

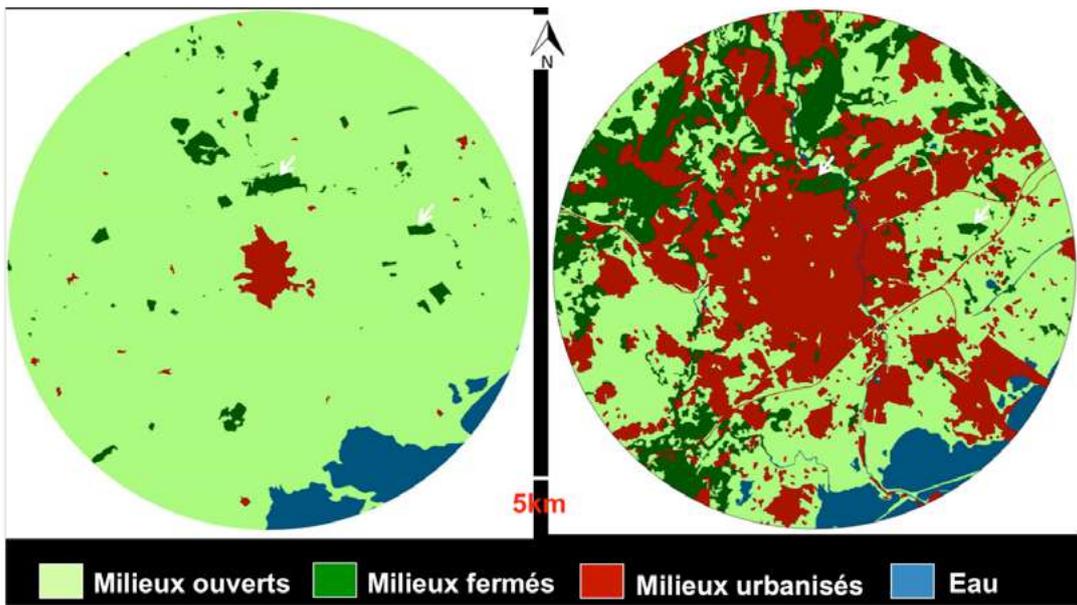


Figure 2.11. Comparaison de l'usage des sols dans Montpellier et ses environs entre le XIX^e (à gauche : 1860) et le XXI^e siècle (à droite : 2006), montrant l'expansion forte des milieux urbanisés.
(Source : Vogt-Schilb et al., 2018.)

PARTIE PISTES DE SOLUTIONS

Protection des espèces à enjeu

Bertrand SCHATZ (CNRS - CEFE)

La première solution pour la conservation de la biodiversité est de protéger certaines espèces reconnues comme vulnérables, rares, menacées et/ou endémiques. Au niveau international, la convention [CITES](#) (aussi appelée « Convention de Washington »), régleme le commerce international des spécimens des espèces inscrites à ses annexes, donc les échanges d'espèces entre pays ; elle concerne plus de 3 000 espèces animales et 40 000 espèces végétales. La Convention [Ramsar](#) (UNESCO, 1970) régit la protection des espèces des zones humides ; à noter le réseau [MedWet](#) qui organise la gestion durable des zones humides dans la région méditerranéenne (27 pays) mais sans pouvoir réglementaire. Au niveau européen, certaines espèces sont protégées via notamment la convention de Bonn (1979) pour les espèces animales migratrices, et la Convention de Berne (1979) pour la vie sauvage (faune et flore) et le milieu naturel.

En France, il existe des [listes](#) d'espèces protégées au niveau national, qui concernent différents groupes taxonomiques comme les plantes vasculaires qu'il faudrait actualiser ([Schatz et al., 2014](#)) mais aussi pour les différents groupes d'espèces animales. Ainsi, il est interdit de détruire, de modifier ou de dégrader les habitats naturels de ces espèces protégées sous peine d'amende. La fonge (champignons), les plantes non vasculaires (lichen, fougère, mousses...), les invertébrés et les espèces de milieu marin restent peu concernés par ces listes nationales même si des projets d'actualisation de ces listes permettraient de les inclure prochainement. En région Occitanie, il existe aussi des [listes](#) d'espèces protégées régionales qui viennent compléter ces listes nationales. Cependant, un effort reste à accomplir pour fusionner les listes d'espèces protégées régionalement issues de l'ex-Languedoc-Roussillon et de l'ex-Midi-Pyrénées (et parfois de certaines listes de protection départementales). Cet effort d'actualisation de listes d'espèces en protection régionale est aussi l'occasion d'une actualisation nécessaire prenant en compte les évolutions récentes des effectifs des espèces.

Plusieurs espèces bénéficient d'un plan de conservation comme le bouquetin ibérique et plus fréquemment d'un plan national d'actions (PNA) ayant des objectifs de connaissance, de conservation et de sensibilisation. C'est le cas de certaines espèces uniquement présentes en Occitanie comme les trois lézards pyrénéens (de Bonnal, du Val d'Aran et d'Aurélios), l'ours brun, l'aster des Pyrénées et le desman des Pyrénées (présent aussi en Nouvelle Aquitaine), mais ces PNA concernent également plusieurs autres espèces ou groupes d'espèces présentes dans d'autres régions. Plusieurs PNA sont gérés par la DREAL Occitanie qui coordonne l'action na-

tionale (aigle de Bonelli, aster des Pyrénées, bouquetin ibérique, desman des Pyrénées, emyde lépreuse, faucon crécerellette, grand tétras des Pyrénées, lézards des Pyrénées, ours brun et vautour moine). Ces PNA se déclinent souvent en PRA, c'est-à-dire en plans régionaux d'actions pour mieux adapter ces actions aux particularités régionales ; c'est le cas pour les chauves-souris, les pollinisateurs, les odonates et les papillons de jour.

Il existe les listes rouges d'espèces qui sont établies selon une méthode standardisée par l'UICN, ces listes se déclinent aux échelles mondiales, européennes, méditerranéennes, nationales et régionales. Elles ont le double objectif d'identifier les espèces en données insuffisantes ayant un besoin de connaissance naturaliste et scientifique et d'identifier les espèces menacées (somme des espèces catégorisées en danger critique d'extinction (CR) plus celles en danger (EN) plus celles vulnérables (VU)). Attention, ces listes rouges ne sont pas des listes d'espèces protégées et n'ont donc pas de pouvoir réglementaire ; elles sont plutôt un outil de communication efficace pour identifier les espèces menacées (et celles en besoin de connaissance) mais aussi pour définir les menaces pesant sur ces espèces et les pistes de solutions pour améliorer leur conservation. Elles permettent aussi d'établir des cartes localisant la présence cumulée des espèces menacées (voir ci-après les exemples pour l'Occitanie).

Pour l'ensemble de ces espèces protégées, il est crucial de documenter et d'actualiser régulièrement les évolutions récentes d'effectifs et de distribution en intégrant la migration attendue des espèces vers le nord ou en altitude. Ainsi, les collectivités en charge de ces protections devront acter ces changements prévus voire les anticiper. Dans ce contexte, l'Occitanie devrait fusionner rapidement les listes d'espèces en protection régionale des deux régions dont elle est issue mais aussi mettre en place une actualisation des listes d'espèces protégées et celles à enjeux, et des sites de suivis à long terme.

Aller plus loin :

- [Liste](#) rouge des Lépidoptères Rhopalocères (Papillons diurnes) & Zygènes d'Occitanie – 2019.
- [Carte](#) du nombre d'espèces menacées des Lépidoptères Rhopalocères (Papillons diurnes) & Zygènes d'Occitanie classées CR, EN, VU et NT par mailles 5x5 km en Occitanie. Données issues des bases des différents partenaires du projet sur la période récente (2008-2018).
- [Liste](#) rouge des Odonates (libellules) d'Occitanie.
- [Carte](#) du nombre d'espèces menacées des Odonates (libellules) d'Occitanie classées CR, EN, VU et NT par mailles 5x5 km en Occitanie – Données issues des bases des différents partenaires du projet sur la période 2007-2017.

Protection des espaces naturels

Bertrand SCHATZ (CNRS - CEFE)

L'autre solution pour la conservation de la biodiversité est de protéger les espaces où elle se trouve. Dans cet objectif, l'Occitanie s'est dotée de plusieurs niveaux de protection correspondant à trois dispositifs nationaux. Le premier regroupe les protections réglementaires qui comprend les [parcs nationaux](#) fédérés par l'OFB, avec en région le Parc national des Cévennes et le Parc national des Pyrénées (5 % du territoire régional), qui ont chacun une zone cœur de protection maximale et une zone d'adhésion où les communes volontaires s'engagent dans une politique de développement durable, en appui à la protection de la zone cœur. L'Occitanie comprend également 17 [réserves naturelles](#) nationales (20 187 ha, soit 0,28 % du territoire) et 13 réserves régionales (11 547 ha, soit 0,15 % du territoire), auxquelles s'ajoutent les 21 réserves biologiques (dirigées ou intégrales) domaniales portées par l'ONF (5056 ha), les réserves nationales de chasse et de faune sauvage et la réserve naturelle marine de Cerbère-Banyuls (650 ha), première réserve marine française, entre Banyuls-sur-Mer et Cerbère dans les Pyrénées-Orientales. Il existe aussi différents dispositifs sur des secteurs de taille plus modeste comme les APPB (Arrêté préfectoral de protection de biotope ou de géotope), les sites classés et les sites inscrits, les opérations Grands Sites et les Grands Sites de France (40 en Occitanie), avec en plus 88 sites UNESCO et plusieurs zones humides réglementées.

Le deuxième groupe correspond à la protection contractuelle des espaces naturels. Il s'agit tout d'abord des 7 parcs naturels régionaux ([PNR](#)) d'Occitanie qui couvrent 22,74 % du territoire (16 537 km²) (sans compter le projet de PNR Comminges-Barousse-Pyrénées) : le PNR des Causses du Quercy, le PNR des Pyrénées Ariégeoises, le PNR des Pyrénées Catalanes, le PNR de la Narbonnaise, le PNR du Haut-Languedoc, le PNR des Grands Causses et les récents PNR d'Aubrac et PNR Corbières-Fenouillèdes. A noter la remarquable continuité écologique de protection, unique en France, des PNR d'Aubrac, des Grands Causses et Haut-Languedoc et du PN Cévennes. Ces PNR se forment autour d'identités territoriales et d'espèces emblématiques et assurent un objectif de développement durable d'activités humaines compatibles avec la biodiversité dans des territoires en grande partie ruraux. Très similaire dans son fonctionnement, le parc naturel marin du Golfe du Lion s'étend sur 4000 km² et regroupe 12 communes littorales du Roussillon et du Languedoc. De leur côté, les zones naturelles d'intérêt écologique, faunistique et floristique (ZNIEFF de type 1 ou 2 ou en milieu marin) ont pour objectif d'identifier et de porter à connaissance les secteurs présentant de fortes capacités biologiques et un bon état de conservation. La région Occitanie compte 1819 ZNIEFF terrestres de type 1, 255 ZNIEFF terrestres de type 2 et 8 ZNIEFF marines.

Les périmètres des ZNIEFF terrestres couvrent 32 500 km² environ (44 % du territoire mais qui peuvent se superposer à d'autres protections d'espaces). Il existe enfin 264 sites Natura 2000 (répartis sur les quatre zones biogéographiques distinctes) couvrant 29 % de l'Occitanie ; ils incluent 215 espèces d'intérêt communautaire, mais aussi des zones de protection spéciale (ZPS), ciblant la conservation d'oiseaux sauvages et des zones spéciales de conservation (ZSC) ciblant celle d'autres espèces et d'habitats.

Le troisième groupe comprend les protections par maîtrise foncière. Il concerne le [Conservatoire du littoral](#) et des rivages lacustres qui était propriétaire de 14 400 ha en Occitanie (fin 2017), soit 25 % du linéaire côtier et lagunaire de la zone méditerranéenne. Il a des missions de préservation de la biodiversité, de maintien des activités traditionnelles, de gestion des flux touristiques et de limitation de l'urbanisation littorale. Le conservatoire d'espaces naturels (CEN) d'Occitanie a un statut associatif, intégré au [réseau](#) national qui agit en faveur de la biodiversité par le biais d'acquisition des terres sur lesquelles sont établies des conventions de gestion valorisant cinq axes complémentaires : connaître, protéger, gérer, valoriser et accompagner. Le CEN d'Occitanie gère actuellement plus de 30 000 ha sur plus d'une centaine de sites, avec près de 1000 ha en propriété/emphytéose. Une autre protection de ce type correspond aux Espaces Naturels Sensibles (ENS), acquis régulièrement par chaque département et dotés de conventions de gestion. A noter ici l'émergence des ORE (Obligations Réelles Environnementales) permettant la création de servitudes environnementales (pour la protection et suivi d'espèces ou d'habitats) par acte notarié en évitant l'expropriation.

Au final, la distinction des quatre grands ensembles régionaux montre que les outils et dispositifs de protection des espaces naturels sont très présents au sud dans l'ensemble des Pyrénées et au nord dans le Massif central alors qu'à l'est le littoral ne comporte qu'un seul PNR, et qu'à l'ouest en Midi-Pyrénées aucune protection majeure n'existe. Cette situation déséquilibrée reflète la répartition des zones de réservoir de biodiversité et celles des zones agricoles ; elle permet cependant de couvrir les zones réservoirs de biodiversité définies dans le SRCE et la grande majorité des espèces à enjeux, avec globalement une proportion importante de la superficie de l'Occitanie concernée par une zone de protection des espaces naturels.

Aller plus loin :

- Cartes 35 à 37 de la cartothèque de la démarche H2O 2030, [en ligne](#).

Les Solutions fondées sur la Nature (SfN) : une diversité d'options pour l'adaptation au changement climatique

Morgane VILLETARD (ARB Occitanie)

Les Solutions fondées sur la Nature (SfN) désignent « les actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité » (définition de l'Union Internationale pour la Conservation de la Nature - UICN, **figure 2.12**). Certaines d'entre-elles permettent de **répondre plus spécifiquement au défi de l'adaptation au changement climatique** ; elles sont nommées les Solutions d'adaptation fondées sur la Nature (SafN).

Les trois types d'actions relevant des SfN, au regard de la définition de l'UICN, s'appuient donc sur les écosystèmes naturels qui, lorsqu'ils sont sains, résilients, fonctionnels et diversifiés, délivrent des services écosystémiques favorables à l'adaptation au changement climatique de nos territoires. Ces actions sont plus précisément :

- La préservation d'écosystèmes fonctionnels et en bon état écologique (p. ex. : préservation de zones humides pour, entre autres, lutter contre les inondations et garantir un meilleur accès à l'eau) ;
- L'amélioration de la gestion d'écosystèmes pour une utilisation durable par les activités humaines (p. ex. : végétalisation des rangs ou inter-rangs des vignes pour, entre autres, maintenir l'humidité du sol, diminuer les pertes d'éléments minéraux, limiter le ruissellement ou encore abriter des auxiliaires de culture) ;
- La restauration d'écosystèmes dégradés ou la création d'écosystèmes (p. ex. : la restauration d'herbiers de posidonies pour, entre autres, amortir la force des houles et ainsi protéger les plages de l'érosion).

C'est en 2009 que le concept de Solutions fondées sur la Nature a émergé, sous l'impulsion de l'UICN, lors de la conférence des Parties de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CC-NUCC) à Copenhague. Ce concept a été développé notamment dans l'objectif de regrouper sous la même bannière une multitude d'actions liées à des concepts très proches : l'ingénierie écologique, la restauration écologique, les infrastructures vertes, la gestion intégrée, etc. Ainsi, nombre de SfN font référence à des pratiques qui existent déjà ; certaines depuis longtemps (p. ex. : gestion souple des dunes littorales).

L'intérêt des SfN réside donc moins dans la proposition de pratiques nouvelles que dans la mise en visibilité et la mise en valeur de pratiques existantes aux multiples bénéfices (encore trop peu connus), pour

faire contrepoids au recours dominant aux pratiques d'ingénierie classiques. L'objectif est donc d'inverser le schéma actuel pour considérer les SfN non plus comme des alternatives mais comme la première option à considérer.

Parmi leurs multiples bénéfices, les SfN présentent l'intérêt de concourir aussi bien aux enjeux relatifs à l'adaptation au changement climatique qu'à ceux relatifs à la préservation, protection et restauration de la biodiversité tout en apportant également de nombreux co-bénéfices sociaux et économiques (maintien des paysages, amélioration du cadre de vie et de la santé humaine, création d'activités de loisir et de tourisme, maintien des activités économiques liées à l'agriculture, la pêche ou la sylviculture...). De plus, ces solutions représentent une alternative efficace, économiquement viable et durable, souvent moins coûteuse à long terme que des investissements technologiques ou la construction et l'entretien d'infrastructures grises. Par leur flexibilité, réversibilité et adaptabilité elles permettent d'éviter les impacts sur les milieux naturels et ainsi d'évoluer pour s'adapter aux incertitudes climatiques et au contexte local.

Ainsi, par leurs nombreux bénéfices, ces solutions font l'objet d'une attention croissante de nombreux acteurs tels que l'État, les scientifiques, les collectivités territoriales, les entreprises, les ONG et associations, etc. Preuve en est avec le projet Life intégré ARTISAN (Accroître la Résilience des Territoires au changement climatique par l'Incitation aux Solutions d'Adaptation fondées sur la Nature), piloté par l'Office Français de la Biodiversité et s'appuyant sur 27 bénéficiaires associés, dont l'objectif est de créer en huit ans (2019-2027) les conditions d'une généralisation du recours aux SafN à l'échelle de la France. Pour ce faire le projet se déploie sur trois échelles : nationale, régionale et locale.

En Occitanie, c'est l'Agence Régionale de la Biodiversité Occitanie qui anime le déploiement régional du projet ARTISAN avec l'arrivée d'une animatrice régionale en septembre 2020 et l'appui de l'Office Français de la Biodiversité et de la Région. L'Occitanie accueille également un des 10 sites pilotes du projet ARTISAN : le Parc Naturel Régional des Pyrénées-Ariégeoises. Celui-ci travaille spécifiquement sur l'intérêt des SafN pour l'adaptation des forêts de son territoire au changement climatique ; forêts qui constituent plus de 55 % du PNR.

Aller plus loin :

- [Standard](#) mondial de l'UICN pour les Solutions fondées sur la Nature, publié en juin 2020.
- [Site](#) du projet Life intégré ARTISAN.



Figure 2.12. Les SfN, un concept englobant diverses approches fondées sur les écosystèmes.
(Source : UICN France, 2018)

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Des exemples de coopération climatique pour compenser les émissions de GES et s'adapter au changement climatique - région

Climat Local - *En savoir plus*

Climat Local propose aux entreprises de compenser leurs émissions de gaz à effet de serre en finançant des projets locaux qui contribuent à l'atténuation et à l'adaptation des territoires au changement climatique. Elle intervient dans toute la France, là où les entreprises souhaitent aider un projet et propose également aux salariés des entreprises de participer à la plantation de haies champêtres avec les propriétaires : c'est la coopération climatique.

L'originalité de Climat Local résulte dans sa capacité à identifier des projets qui correspondent aux attentes des entreprises : aider un maraîcher bio, une commune, un éleveur... Chaque projet est unique et contribue à la transition écologique et énergétique des territoires. En deux ans, Climat Local a financé avec 11 entreprises d'Occitanie la plantation de 9500 arbres et arbustes sur le territoire régional, ce qui renforce la résilience des activités économiques face au changement climatique. Aujourd'hui, Climat Local déploie des plateformes de contribution Carbone à l'échelle des collectivités locales pour rapprocher financeurs et porteurs de projets, telle que la [plateforme](#) de contribution Carbone du Grand Albigeois.



Crédit photo : J. Lavaud / Climat Local



Étudier la biodiversité en Occitanie

Philippe JARNE (CNRS - CEFE), Gaëlle MATHIEU-ERNANDE (UM - Biodiv'Oc)

Les changements globaux, résultat des activités humaines, affectent l'ensemble des composantes de la biodiversité et de l'environnement, et constituent un défi majeur pour nos sociétés. Tous les espaces sont concernés, en particulier les plus riches en biodiversité. L'Occitanie, qui relève pour partie d'un des 34 points chauds de biodiversité à l'échelle mondiale, en ressent de nombreuses conséquences. Au-delà d'un réchauffement climatique, les aspects les plus marquants de ces changements à l'échelle régionale sont l'altération de la biodiversité par la modification de l'usage des milieux (continentaux et marins), le morcellement et l'artificialisation des espaces, la fragmentation et la perte afférentes d'habitats, l'arrivée d'espèces exotiques, l'émergence ou la réémergence de maladies, ou encore l'érosion de la biodiversité.

Anticiper les réponses de la biodiversité aux changements planétaires et mitiger leurs effets à l'échelle régionale est donc une problématique centrale en Occitanie si on veut maintenir attractivité et qualité de vie. Elle nécessite une « écologisation » des fonctionnements individuels et collectifs, s'appuyant sur des approches scientifiques éprouvées, pour traiter ces problèmes urgents, proposer des solutions de gestion et contribuer à la transition vers une société plus respectueuse de l'environnement.

La communauté de recherche en écologie environnementale d'Occitanie apporte des réponses par des approches d'écologie et évolution au sens large. Première communauté nationale, forte de près de 2 500 personnels de recherche, elle dispose d'une reconnaissance et attractivité internationale exceptionnelles pour ses travaux fondamentaux et appliqués (voir p. ex. le classement de Shanghai des universités dans le domaine de l'écologie). Cette communauté couvre des champs thématiques larges, du gène à l'écosystème, du virus à l'éléphant sur l'ensemble des zones géographiques planétaires incluant une implantation forte en milieux tropicaux et méditerranéens.

Elle développe une palette d'approches, incluant l'expérimentation, l'observation, la modélisation et la synthèse de données, dispose d'infrastructures technologiques de haut niveau et développe des approches interdisciplinaires, en particulier avec les sciences agronomiques, de l'univers ou les sciences humaines et sociales. Enfin, elle inscrit ses travaux dans un riche partenariat, public et privé, pour relever les défis posés par les changements globaux et proposer des solutions pour le futur (voir le [rapport](#) du Comité Consultatif Régional pour la Recherche et le Développement Technologique Occitanie de 2020).

Ces recherches en écologie environnementale s'appuient, à l'échelle régionale, sur une série d'outils et d'infrastructures (voir [figure 2.13](#)) gérés et largement mutualisés entre acteurs de la recherche (organismes de recherche et établissements d'enseignement supérieur), mais aussi avec les partenaires socio-économiques. Ces dispositifs sont fortement intégrés dans des réseaux de recherche, du local (p. ex., réseau des serres expérimentales de Montpellier, [Resem](#)) au national et à l'international ([réseau ANAEE Europe](#)). Ils incluent (de façon non-exhaustive) :

- programmes et réseaux structurants incluant de nombreuses unités / équipes de recherche : ils sont centrés sur des thématiques plus ou moins spécifiques et permettent de mener des observations / expérimentations sur le moyen ou long terme et interdisciplinaires. Ainsi, l'Occitanie héberge deux défis-clés (BiodivOc et RIVOC), quatre laboratoires d'excellence (Labex CEBA, Cemeb, CORAIL et TULIP), deux observatoires des sciences de l'univers (OSU Oreme et OMP), un observatoire homme-milieu (Haut Vicdessos en Ariège), la zone-atelier [Pyrénées Garonne](#) ou le réseau Microbiologie en Occitanie ;
- infrastructures de recherche : il s'agit de moyens expérimentaux lourds, collectifs et mutualisés incluant des bâtiments dédiés et des surfaces de travail conséquentes (p. ex., 4 ha de terrains expérimentaux CNRS gérés par l'UMR Cefe à Montpellier et 50 ha par l'UMR SETE à Moulis). Viennent s'ajouter l'[Ecotron](#) (Montpellier) et les stations de Banyuls et de Mooréa ([SEE Corail](#)) ;
- les plates-formes techniques : elles sont intégrées aux infrastructures de recherche ou à des unités de recherche. Parmi celles-ci, citons notamment pour Montpellier le site instrumenté de la forêt de [Puéchabon](#) (Hérault, étude de l'impact du changement climatique sur les forêts), le [vectopole](#) (étude des arthropodes vecteurs de maladies), les plates-formes d'analyse génomique, d'écologie chimique, et d'études du milieu marin ([Medimer](#) et Celimer). En région toulousaine, on retiendra les metatron et aquatron de Moulis et les plateformes de phénotypage (TPMP, Heliaphen, Agrophen). Enfin pour Perpignan / Banyuls, notons une plate-forme d'épigénétique et les [installations expérimentales](#) pour l'étude des écosystèmes marins et les plateaux d'analyses moléculaires de [Bio2Mar](#).

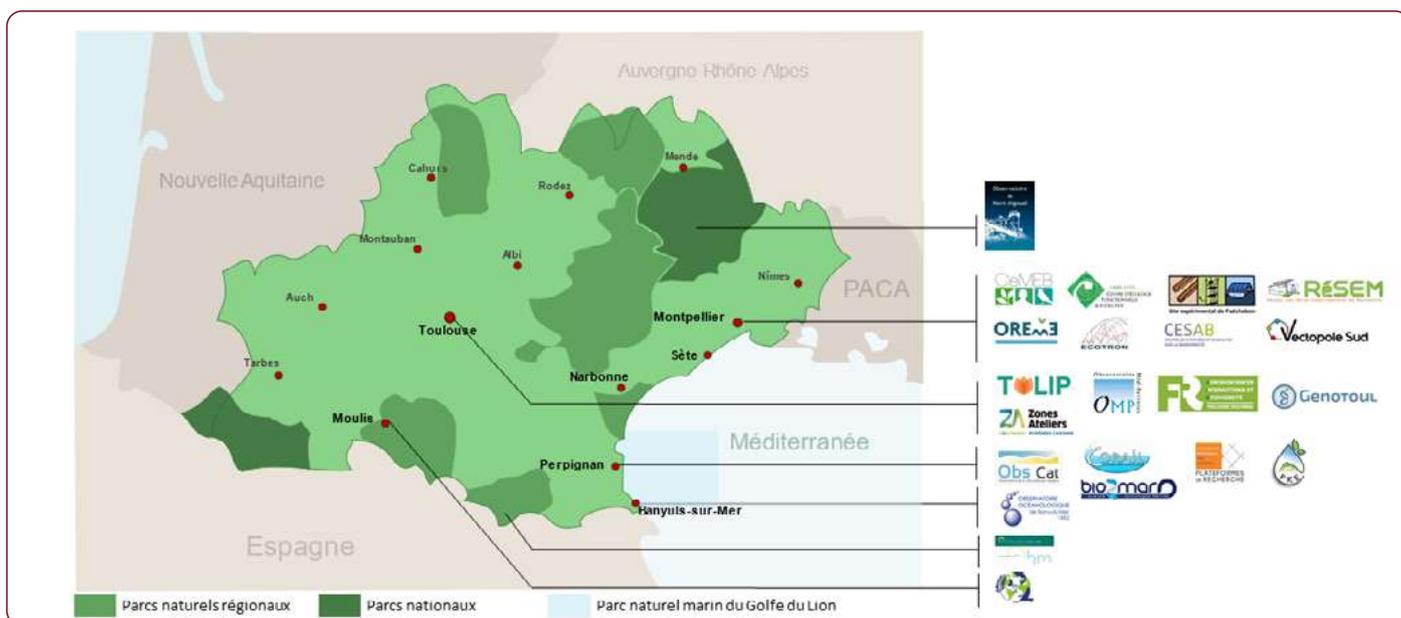


Figure 2.13. Les infrastructures de recherche et outils collectifs en écologie environnementale en Occitanie. (Source : BiodivOc, pour le CROCC_2021)

Encadré 2.A. Le défi clé BiodivOc

Un nouvel outil de la communauté scientifique en Occitanie pour l'étude de la biodiversité est le défi clé [BiodivOc](#), financé par la Région Occitanie (2 M€ pour la période 2021-2024). Il vise à renforcer l'excellence scientifique et à stimuler les synergies pour accompagner les changements qui s'imposent. Porté par l'Université de Montpellier, BiodivOc vise à développer des recherches fondamentales en écologie et évolution autour du thème général « Dynamique, résilience et gestion de la biodiversité et d'écosystèmes soumis à des pressions environnementales d'origine humaine ». Il s'agit de comprendre la dynamique et l'adaptation de la biodiversité dans des environnements changeants en prenant pleinement en compte les interactions Homme-Nature pour « prévenir, réduire et s'adapter ». Cela amène des thématiques émergentes autour par exemple de la base (épi)génomique de l'adaptation, des interactions entre espèces (incluant pathogènes et microbiote), de la réponse aux polluants, des espèces sensibles ou invasives et des milieux d'interface. Elles sont abordées par des approches intégratives et interdisciplinaires pour la scénarisation et la projection de futurs possibles, mais aussi pour proposer des solutions aux changements globaux en formant les gestionnaires de demain.



Pour atteindre ces objectifs, BiodivOc mobilise la majeure partie de ses ressources pour soutenir des projets de recherche régionaux ambitieux et collaboratifs, répondant aux problématiques spécifiques du territoire occitan. Par ses actions d'animation, BiodivOc vise également à créer des synergies entre les acteurs de la recherche et les partenaires gestionnaires de la biodiversité, développer les formations et des outils de gestion et donner aux problématiques de la biodiversité une plus grande visibilité pour accompagner les politiques publiques et participer à la dissémination des savoirs vers tous les publics.

Contacts :

Directeur BiodivOc : Philippe JARNE (CNRS - CEFE)
 Cheffe de projet : Gaëlle MATHIEU-ERNANDE (UM - BiodivOc)



CHAPITRE

3

EAU

Coordination : Sylvain BARONE et Pierre CHEVALLIER

Rédaction : Valérie BORRELL ESTUPINA, Alexandre BRUN, Yvan CABALLERO, Roxelane CAKIR, Marine COLON, Françoise ELBAZ POULICHET, Julie FABRE, Patrice GARIN, Stéphane GHIOTTI, Lætitia GUÉRIN-SCHNEIDER, Camille LABROUSSE, Pierre LE COINTE, Sophie RICHARD, Yves TRAMBLAY, Freddy VINET.

Introduction

Sylvain BARONE (INRAE - G-EAU)

Ce chapitre a été produit par 17 chercheurs de différentes disciplines (hydrologie, hydrogéologie, géographie, science politique, sciences de gestion...), appartenant à une communauté de recherche régionale sur l'eau bien structurée et identifiée aux niveaux national et international. Les contributions réunies ici présentent un état synthétique et actualisé des connaissances qui s'appuie sur les derniers scénarios climatiques disponibles et contient à la fois un diagnostic de la situation actuelle et des projections vers l'avenir, notamment à 2050 et 2100. Elles proposent un aperçu des effets perceptibles ou possibles des changements climatiques sur les eaux superficielles et souterraines, les usages et les besoins, les risques et la gouvernance de l'eau, et mettent en lumière un certain nombre d'enjeux, dans un territoire aux configurations hydro-sociales extrêmement variées.

On voit ainsi se dessiner un paysage globalement marqué par des précipitations plus faibles en été mais plus fortes et plus fréquentes en automne et en hiver, une réduction de la couverture neigeuse, une augmentation de l'évapotranspiration, des déficits de recharge des aquifères plus ou moins importants selon les endroits, des débits d'étiage plus bas, une réduction des débits des fleuves côtiers et à l'inverse une augmentation (hors été) des débits dans les bassins de l'Adour et de la Garonne, des inondations par ruissellement plus conséquentes et accentuées par l'artificialisation des sols. Les impacts notables à l'horizon 2050 s'accroissent encore à l'horizon 2100 pour tous les scénarios. L'un des enjeux majeurs des prochaines années et décennies concerne bien sûr l'atteinte ou la préservation de l'équilibre, notamment en

période d'étiage, entre des usages variés, évolutifs, parfois mal connus et des ressources qui devraient structurellement s'amenuiser, et la nécessité d'intégrer pleinement dans la balance les besoins des écosystèmes. Un autre enjeu a trait à la gestion du « trop » d'eau, qui touche déjà de façon extrêmement forte certaines zones de la région.

Pour l'ensemble de ces enjeux, il est devenu évident que les réponses techniques (optimisation du fonctionnement des réseaux d'eau potable et des dispositifs d'irrigation, projets – parfois très controversés – de stockage, valorisation des eaux de pluie ou des eaux usées traitées, ouvrages de protection contre les inondations, etc.) ne peuvent plus conduire à faire l'économie de réflexions plus systémiques : sur les manières de penser et de pratiquer l'aménagement du territoire, l'urbanisme, l'agriculture, le tourisme, etc. ; mais également sur les manières de gouverner les territoires, de délibérer collectivement et de construire des compromis.

Enfin, si l'existence de résultats convergents permet de présenter un état plus ou moins stabilisé des savoirs, les contributions font état à la fois de difficultés pour extraire des tendances généralisables, d'incertitudes scientifiques toujours nombreuses (sur la prévision des débits de crue, l'évolution des usages effectifs, etc.) et de points encore peu documentés dans la littérature (par exemple sur l'impact des changements climatiques sur certains aspects de la qualité de l'eau). Elles esquissent en cela un début d'agenda pour les recherches à venir.



Crédit photographie : Melkan Bassil / www.imagesoccitanie.com

Partie RESSOURCES

Eaux de surface

Roxelane CAKIR (UPS – ECOOMP) : pour les bassins de la Garonne et de l'Adour (avec la collaboration de membres de l'équipe EcoBiz).

Camille LABROUSSE (UPVD - CEFREM) : pour les fleuves côtiers méditerranéens.

Valérie BORRELL ESTUPINA (UM - G-EAU) : pour les bassins des Gardons.

Pierre CHEVALLIER (IRD - HSM) : coordination et assemblage.

Le réseau hydrographique et les régimes hydrologiques de surface en Occitanie étant particulièrement variés, ils ont été regroupés pour l'usage de cette synthèse en trois grandes zones :

- les bassins de la Garonne et du haut Adour, que l'on peut partager en trois sous-zones : la Garonne à l'amont de Toulouse et le haut Adour influencés par un régime nival, les affluents de rive droite (Tarn et Lot) soumis à l'influence du Massif central et les

rivières gasconnes de rive gauche contrôlées par le Canal de la Neste ;

- les fleuves côtiers méditerranéens ;
- les affluents de rive droite du Rhône (Gardons et Cèze).

Une petite zone au nord de l'Aveyron relève du bassin de la Loire ; elle n'est pas considérée ici. L'infographie ci-dessous présente ces différentes zones et les régimes hydrologiques associés (figure 3.1).

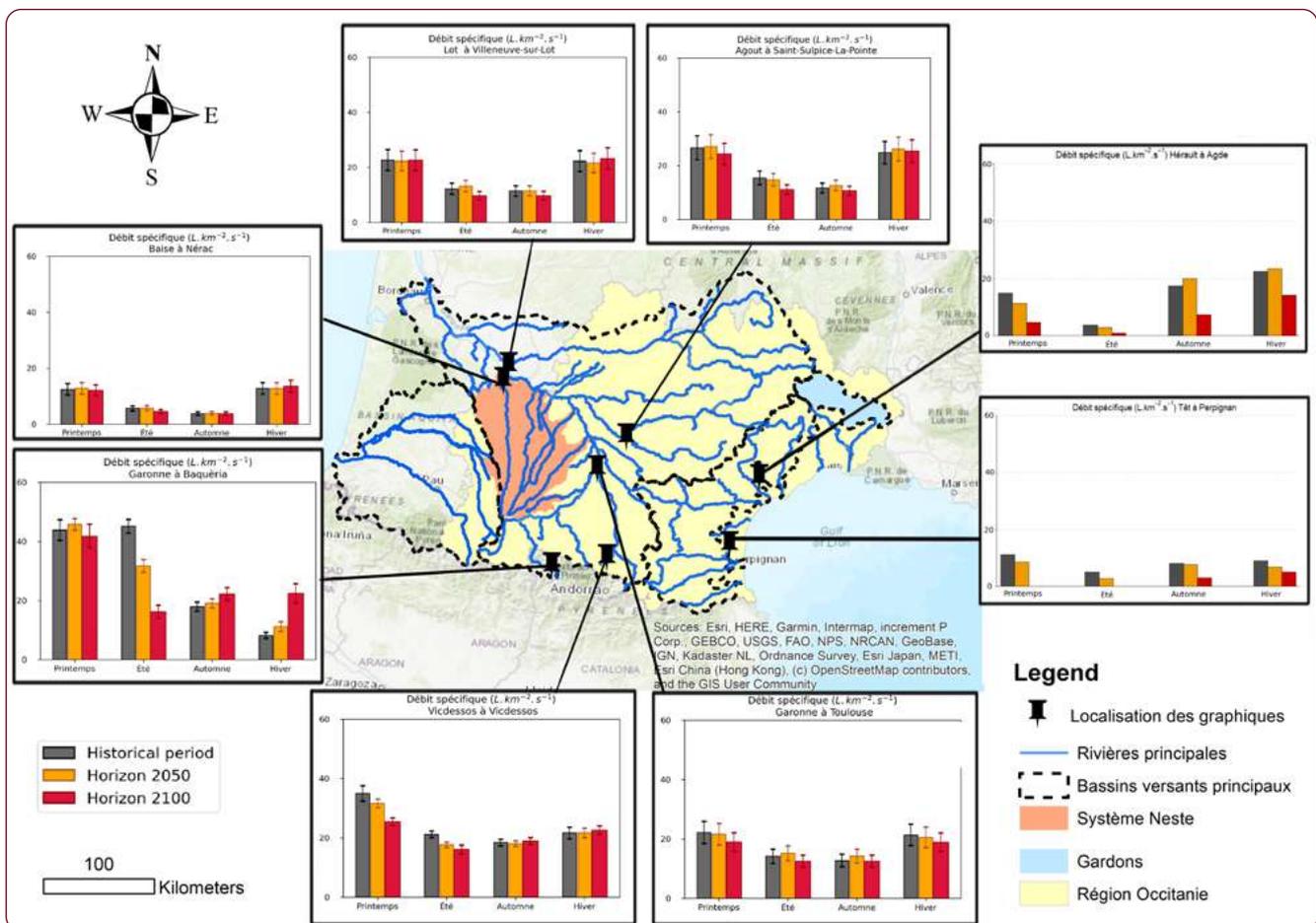


Figure 3.1. Réseau hydrographique de la région Occitanie.

(Source : Infographie réalisée pour le CROCC21)

Les histogrammes représentent des débits moyens saisonniers (trimestriels) spécifiques en L/s/km² ; ils sont ramenés à la superficie du bassin versant et sont donc comparables entre eux.

1) Garonne et Adour : débits simulés avec le modèle SWAT (projets Interreg Aguamod et Piragua, Cakir, 2020) sur la période historique (1983-2010), ainsi qu'aux horizons milieu de siècle (2021-2050) et fin de siècle (2071-2100) selon le scénario RCP8.5. Printemps = AMJ ; été = JAS ; automne = OND ; hiver = JFM.

2) Fleuves côtiers méditerranéens : débits simulés avec un modèle statistique (Labrousse, 2021) sur la période historique (2008-2018), ainsi qu'aux horizons milieu de siècle (2040-2060) et fin de siècle (2080-2100) selon le scénario RCP8.5. Printemps = MAM ; été = JJA ; automne = SON ; hiver = DJF.

3) Gardons : l'évolution des débits des Gardons n'est pas représentée ici, elle est décrite dans le texte correspondant.

NB. De nombreuses incertitudes viennent limiter les projections hydrologiques. Elles sont inhérentes, pour la période actuelle, à une connaissance encore limitée des interactions surface-souterrain ainsi que des volumes prélevés. S'agissant de la période future, s'ajoutent d'autres incertitudes liées à la modélisation climatique, à l'extrapolation des scénarios d'usages et de gestion, à l'évolution des ressources en eaux souterraines et de l'humidité des sols, à la modélisation hydrologique dans un contexte non stationnaire. Lorsque cela est possible, ces incertitudes (écarts-types) sont représentées sur l'infographie par des segments verticaux.

Bassins de la Garonne et du haut Adour

Cette section est basée sur les résultats des projets Interreg Aguamod et Piragua. Le projet Piragua utilise les projections climatique Euro-CORDEX et du projet CLIMPY (Interreg POCTEFA), qui montrent une évolution de l'ensemble des composantes de la répartition des ressources au sein du cycle hydrologique (Grusson et al., 2018). On note une augmentation des débits particulièrement marquée sur la période de septembre à mai (figure 3.2). Sur la période estivale cependant, les débits baisseraient sur la majorité du bassin versant, à l'exception de la zone pyrénéenne. On a donc un effet notable de l'augmentation du ruissellement qui participe à l'augmentation des débits, à l'exception de la période estivale. Ce phénomène est dû à l'augmentation de la part liquide des précipitations en hiver en altitude (moins de neige, plus de pluie), des stocks de neige moins importants et qui subissent des épisodes de fonte plus rapide et plus précoce, une augmentation significative des précipitations automnales et une augmentation significative des températures estivales.

La variation des débits à l'horizon 2050 est significative si l'on regarde la variation saisonnière, mais est négligeable si l'on regarde la variation annuelle, les augmentations de débit de septembre à mai compensant les diminu-

tions estivales. À l'horizon 2100, les variations de débit semblent plus marquées, mais elles s'accompagnent également d'incertitudes plus grandes. Concernant les différentes composantes du cycle hydrologique, les résultats montrent un fort impact sur la teneur en eau du sol et une augmentation substantielle de l'évapotranspiration en hiver. En été, une partie des bassins versants de la zone est confrontée à des flux d'évapotranspiration plus faibles, ce qui s'explique par un manque de teneur en eau du sol pour répondre à la demande en évaporation, mettant en évidence une intensification de la sécheresse des sols, impactant le développement végétal. Les flux d'eau de surface diminueraient considérablement en été, alors qu'en hiver, le débit augmenterait dans les têtes de bassin versant montagneuses en raison d'un stock de neige plus faible associé à une augmentation des précipitations liquides, ce qui profite au ruissellement de surface.

Le bassin versant de la Garonne présente en outre la particularité du système Neste, constitué par un canal longeant le piémont pyrénéen depuis Lannemezan pour réalimenter les cours d'eau des coteaux gascons, principalement pour un usage agricole. **La pression sur la ressource en eaux de surface provoquée par le changement climatique augmente la difficulté pour ses gestionnaires à répondre aux demandes sociétales et environnementales.**

Bassin	Grand bassin	Aire (km ²)	Actuel	Simulation milieu de siècle	Simulation fin de siècle
Garonne à Tonneins	Garonne	50 800	12,1	12,4	11,4
Lot à Villeneuve-sur-Lot	Garonne	12 890	17,1	17,2	16,3
Garonne à Toulouse	Garonne	11 470	17,6	17,9	15,7
Aude à Moussan	Méditerranée	4 838	11,6	13,0	11,0
Agout à Saint-Sulpice-La-Pointe	Garonne	3 372	19,6	20,1	17,9
Baise à Nérac	Garonne	2 891	8,7	8,8	8,5
Hérault à Agde	Méditerranée	2 550	13,3	11,4	7,2
Orb à Béziers	Méditerranée	1 330	19,1	16,0	10,7
Têt à Perpignan	Méditerranée	1 300	7,2	6,4	2,3
Save à Larra	Garonne	1 277	7,2	7,9	6,5
Agly à Estagel	Méditerranée	903	6,1	5,8	2,3
Tech à Argelès-sur-Mer	Méditerranée	778	14,4	17,6	13,5
Vicdessos à Vicdessos	Garonne	232	24,0	22,3	20,8
Garonne à Baquèria	Garonne	50	28,8	26,9	25,7

Figure 3.2 Bassin de la Garonne et fleuves côtiers méditerranéens : débit spécifique annuel moyen en L/s/km² sous un scénario RCP8.5 et pour différentes périodes (classement par superficie décroissante). (Source : Cakir et al., 2020 ; Labrousse, 2021)

Bassin	Qobs	Qmod
Hérault	13,3 ± 4,3	13,8 ± 4,3
Orb	18,3 ± 6,4	17,2 ± 4,5
Aude	6,5 ± 2,7	5,9 ± 2,7
Agly	6,5 ± 2,5	3,6 ± 2,7
Têt	5,8 ± 3	5,3 ± 2,4
Tech	7,9 ± 3,3	9,2 ± 4,5

Figure 3.3 Moyenne des débits observés (Qobs) et modélisés (Qmod) en L/s/km² et écart-type pour la période 2008-2018. (Source : Labrousse et al., 2020)

Bassins côtiers méditerranéens

La côte méditerranéenne occitane compte six bassins versants majeurs qui sont du nord-est au sud-ouest : l'Hérault, l'Orb, l'Aude, l'Agly, la Têt et le Tech. Ils drainent les massifs des Pyrénées, Cévennes/Grands Causses et Corbières et leurs fleuves s'écoulent dans le Golfe du Lion. Chacun de ces bassins versants ont pu faire l'objet de recherche concernant le devenir des ressources sous changement climatique ; cet article se concentre sur deux études portant sur l'hydrologie de l'ensemble de ces six bassins versants.

La thèse de [Lespinas \(2008\)](#) montre une réduction des débits des fleuves côtiers méditerranéens de 20 % en moyenne entre 1965 et 2004, avec des disparités amont-aval. La réduction observée concerne la partie amont des bassins de la Têt et de l'Aude, en lien avec une diminution de l'enneigement, visible notamment sur les enregistrements des stations d'altitude. Elle concerne également la partie aval des bassins de l'Hérault et de l'Orb, en lien probable avec une réduction des eaux souterraines et des précipitations hivernales ainsi qu'à un couvert forestier croissant. Dans cette même thèse l'évolution possible des débits de ces fleuves pour la période 2071-2100 par rapport à la référence 1961-1990 a été simulée sous un scénario A2 et B2 (IPCC, 2007), en utilisant le modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel (GR2M). Ces simulations montraient une réduction des débits annuels allant de -26 à -54 % ou de -14 à -41 % selon le scénario A2 ou B2 respectivement. Néanmoins, Lespinas soulignait que, malgré la bonne reproduction des séries hydrologiques sur la période de référence, les tendances statistiques n'étaient pas si bien reproduites par le modèle.

Étude actuelle. En partant des données climatiques SAFRAN, [Labrousse et al., \(2020\)](#) proposent un modèle statistique qui a su reproduire à la fois les séries hydrologiques des 6 fleuves côtiers et aussi les tendances linéaires sur la période historique. À titre d'exemple, la [figure 3.3](#) présente la comparaison des écoulements moyens spécifiques (en L/s/km²) sur la période 2008-2018 selon les valeurs observées (stations de jaugeage) et les valeurs modélisées (modèle statistique).

Régimes futurs : projections période 2040-2060 et 2080-2100 sous un scénario RCP8.5 (voir chapitre-enjeu Climat régional). À partir de données de 6 Modèles Climatiques Régionaux (RCMs), le même modèle statistique est utilisé pour explorer les évolutions des écoulements annuels spécifiques pour les 6 fleuves côtiers sur plusieurs périodes sous un scénario RCP8.5.

De façon générale, ces résultats nous indiquent que sous un scénario RCP8.5 nous pouvons observer **une évolution des débits des fleuves côtiers de l'ex-région Languedoc-Roussillon qui va à la baisse, baisse qui serait beaucoup plus importante au cours de la seconde moitié du siècle.**

Bassins des Gardons

Cette section est basée sur la bibliographie disponible concernant le devenir de l'hydrologie des bassins des Gardons sous l'influence du changement climatique.

Les Gardons sont des cours d'eau méditerranéens contrastés, aux hétérogénéités géologique, géographique et météorologique amont-aval marquées. L'évolution sur la période 1961-2020 des précipitations ne présente pas de tendance annuelle particulière, mais démontre **une grande variabilité interannuelle avec -25 % des pluies l'été, induisant une baisse des débits d'étiage et une augmentation des besoins en eau.** Les projections climatiques de fin de siècle pour les Gardons dessinent des cumuls de précipitations estivaux à la baisse (RCP8.5) pour la majorité des simulations (de +15 à -45 %), qui pourraient engendrer une baisse de l'hydrologie des Gardons à l'étiage de -20 à -30 % en milieu de siècle et atteindre -30 % à -50 % à l'horizon 2100. On note que malgré certaines projections de précipitations à la hausse, l'ensemble des résultats suggèrent une baisse des débits moyens, du fait notamment de la forte hausse de l'évapotranspiration. Les simulations montrent aussi une augmentation de la fréquence des étiages, qui pourrait doubler en milieu de siècle et quadrupler en fin de siècle, la durée moyenne des épisodes augmentant dans des proportions comparables.

Les projections futures sur l'évolution des débits de crues restent plus rares et incertaines. La fréquence des pluies intenses automnales augmenterait en fin de siècle (de 2,55 à 3,57 événements/an selon [Tramblay et al., 2012](#)) et les événements seraient davantage répartis entre les saisons ([Labrousse, 2021](#)). Leurs intensités journalières pourraient aussi augmenter de +5 % en moyenne et atteindre +5 à +40 % l'hiver. Toutefois, aucune information sur leurs intensités infra-journalières n'est disponible, pourtant capitale pour la genèse des crues éclairs. Une augmentation des intensités des orages irait dans le sens d'une augmentation des ruissellements. L'augmentation de la température et des prélèvements irait dans le sens d'une augmentation de la capacité de rétention des réservoirs souterrains, sans toutefois considérer l'évolution des états de surface. Sur le bassin voisin du Vistre ([Harader, 2015](#)), une ancienne crue « futurisée » verrait son amplitude augmenter de +10 % et sur le bassin de l'Orbieu ([Colmet-Daage, 2018](#)), cette même méthode de futurisation projette une augmentation de +20 à +30 % des débits de pointe à l'horizon de la fin de siècle. Mais selon les états futurs considérés d'humidité des sols et de précipitations, cette variation pourrait aussi bien être largement supérieure que s'inverser !

En l'état actuel des connaissances, les projections futures qui pourraient être retenues pour les Gardons indiquent :

- des précipitations **en baisse l'été avec une aggravation des périodes de sécheresse**, une diminution des débits d'étiage d'au moins 30 %, ainsi qu'un possible renforcement de l'intermittence ;
- des précipitations plus **fréquentes**, probablement plus **violentes, décalées** en saison conduisant à des crues éclairs marquées par de forts ruissellements.

Eaux souterraines

Yvan CABALLERO (BRGM Montpellier - G-EAU), Pierre LE COINTE (BRGM Toulouse)

Les eaux souterraines s'écoulent et s'emmagentent dans les formations géologiques, qui sont aquifères lorsqu'elles sont suffisamment perméables et poreuses. Elles sont exploitées par pompage via des forages ou bien par captage de sources. Elles alimentent 65 % de la demande en eau potable de la région (CGDD, 2017). En période d'étiage, elles soutiennent les débits des cours d'eau et contribuent au maintien des zones humides dépendantes. Regroupées en près de 150 masses d'eau souterraines à l'échelle de la Région (SDAGEs Rhône-Méditerranée-Corse et Adour-Garonne, 2015), leur fonctionnement est contrasté et souvent mal connu.

La région Occitanie présente une grande diversité de types d'aquifères (figure 3.4, gauche) :

a. Les aquifères alluviaux que l'on trouve le long des cours d'eau, actuels (Garonne, Ariège, Tarn, Aveyron, Lot, Adour, Hérault, Orb) ou anciens (Vistrenque), et les aquifères fluvio-glaciaires dans les Pyrénées (bassins en amont de Montréjeau et de Lourdes), sont généralement productifs et en relation hydraulique avec les cours d'eau ;

b. Les aquifères sédimentaires sont un empilement de couches perméables (sables, roches carbonatées...) et moins perméables (argiles, marnes...). Productifs sur le littoral, ils sont très exploités (Plaine du Roussillon, Astien d'Agde-Valras). Dans le Bassin aquitain, les Sables Infra-Molassiques, sous-couverture, sont exploités dans le Gers. En montagne, les intenses déformations et plissements subis les rendent plus hétérogènes et compartimentés (voire karstifiés), mais ils sont essentiels pour les usages locaux ;

c. Les aquifères karstiques résultent de la dissolution des roches carbonatées par le dioxyde de carbone dissous dans l'eau, qui crée des galeries et des grottes visitables. Sur la façade méditerranéenne, une baisse du niveau de la mer de plus de 1000 m il y a 5 Millions d'années a généré la plupart des systèmes karstiques connus (Lez, Gardiole, bas-Agly) alors que dans les Pyrénées et les Causses du Quercy, d'autres mécanismes ont été à l'œuvre (Fontaine des Chartreux ; chaînon d'Aspet : Arbas, Aliou, Baget ; plateau de Sault : Fontestorbes, Font Maure, Font Bergens) ;

d. Les aquifères fissurés (Cévennes, Montagne Noire, Pyrénées) que l'on trouve dans les formations granitiques, schisteuses, voire volcaniques présentant un horizon altéré en surface et reposant sur de la roche fracturée. Leur productivité est faible mais leurs sources sont captées et essentielles.

Le changement climatique va affecter la consommation de l'eau du sol par la végétation (évapotranspiration) et les flux d'eau qui percolent au travers du sol et dans la roche (recharge) pour atteindre la nappe. La recharge est apportée par l'infiltration des eaux de pluie, des lacs ou des cours d'eau et par des flux venant d'autres aquifères. La figure 3.4 (droite) montre que la recharge potentielle moyenne annuelle est plus élevée sur les reliefs que dans les plaines et sur la côte.

La figure 3.5 montre que, sous le scénario RCP8.5 et d'ici le milieu du siècle (2050), **la région pourrait subir un déficit de recharge potentielle sur l'ensemble de son territoire**. Ce déficit pourrait être plus marqué sur les plaines et la côte (-20 % à -30 %) que sur les reliefs (-10 % à -20 %). Cependant, la recharge étant plus importante sur les reliefs et ceux-ci contribuant à alimenter les aquifères des plaines, ce moindre déficit peut malgré tout avoir un impact significatif.

Enfin, le déficit pourrait dépasser les -30 % dans certains secteurs comme le haut bassin versant de la Têt, la basse vallée de l'Aude et la vallée de la Garonne à Toulouse (Lanini et al., 2019, Le Cointe et al., 2020, Caballero et al., 2021). La situation pourrait continuer de se dégrader à l'horizon de la fin du siècle avec des déficits supérieurs à -10 % partout et pouvant atteindre, voire dépasser les -30 %, sur les zones indiquées précédemment.

Cette situation compliquera probablement l'approvisionnement des usages dans certains secteurs, indépendamment de l'évolution future de ces derniers. Des progrès restent donc à faire pour mieux connaître la ressource en eau souterraine de notre région. Ils seront nécessaires si nous voulons envisager des stratégies d'adaptation au climat futur en termes de ressources en eau.

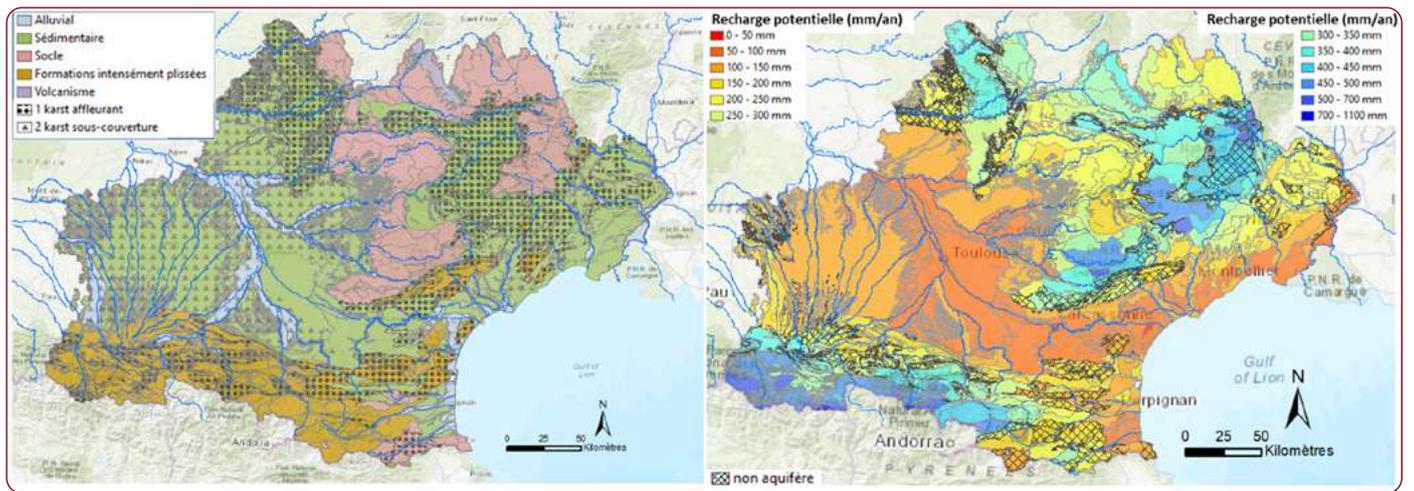


Figure 3.4 - gauche. Formations aquifères d’Occitanie (d’après champ ThèmeEH de la BDLISA et de la surcouche Karst (Brugeron et al., 2018)) ; **droite** - Recharges potentielles moyennes (recharge apportée par les précipitations, moyenne annuelle sur la période 1980-2010). Fond de carte : World topographic map – ©ArcGIS. (Source : Caballero, 2021, pour le CROCC)

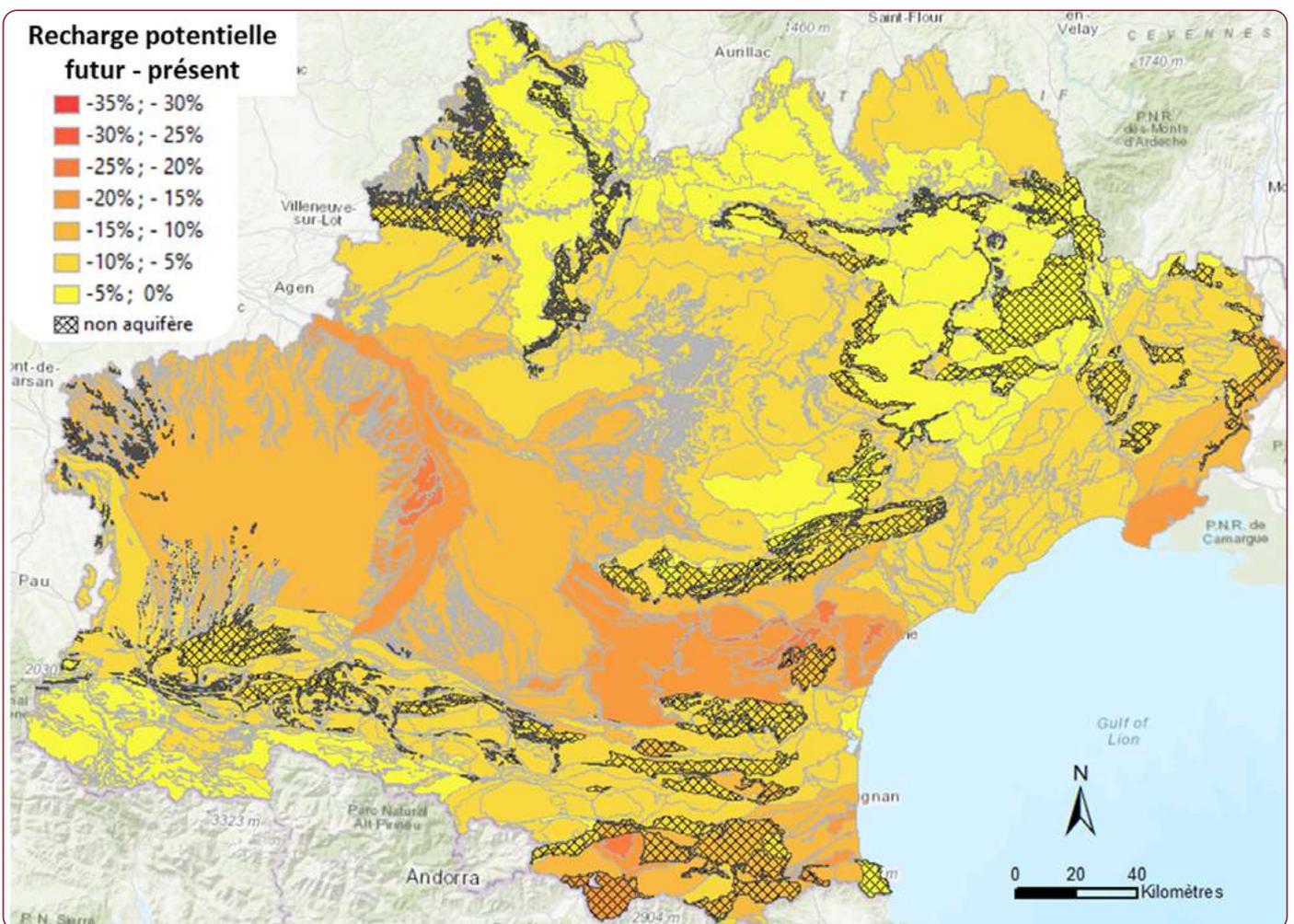


Figure 3.5. Anomalies moyennes des projections de recharge potentielle moyenne annuelle entre les valeurs futures à l’horizon 2050 (2041-2060) et présentes (1981-2010) calculées à partir de 5 projections climatiques issues de CMIP5 (Taylor et al., 2012), régionalisées de deux manières différentes (Pagé et al., 2009 ; Dayon, 2015) - Fond de carte : World topographic map – ©ArcGIS.. (Source : Caballero, 2021, pour le CROCC)

À la poursuite du Graal de l'équilibre « besoins-ressources en eau »

Patrice GARIN (INRAE - G-EAU)

Malgré les incertitudes sur l'ampleur des effets de la dérive climatique sur la baisse des débits des cours d'eau et les recharges des aquifères d'une part, sur l'augmentation de l'évapotranspiration et les changements d'usages d'autre part, **il ne fait pas de doute que la quête de l'équilibre « besoins – ressources » en eau en période d'étiage constituera un enjeu majeur en Occitanie.** Les deux termes de cet équilibre seront à considérer simultanément, tant ils relèvent de choix sociétaux entremêlés sur les modèles de développement et sur les relations Homme – Nature. Les ambitions de restauration des milieux aquatiques pour en valoriser les fonctionnalités, de maîtrise des pollutions ou d'utilisation des capacités des sols à stocker l'eau seront déterminantes sur l'ampleur des besoins en eau restants. Nous n'aborderons ici que ce qui a trait à l'accroissement des ressources mobilisables.

La première voie consistera à optimiser l'exploitation des stocks naturels et artificiels existants à l'échelle régionale pour répondre à l'évolution des besoins prioritaires : réallocation des droits entre usages et modifications des règles d'exploitations des ressources superficielles et souterraines ; révision des droits et obligations pour les ouvrages de stockage ou de transfert en concession (hydroélectricité, soutien d'étiage, irrigation, multi-usage), intégration de l'ensemble des retenues – y compris les plus petites et privées – dans une gestion coordonnée à l'échelle des sous-bassins. L'ordre de grandeur des volumes en jeu dans ces retenues dépasse plusieurs dizaines à centaines de millions de m³ pour l'Occitanie.

L'accroissement des capacités de stockage, que ce soit au sein de grands ouvrages structurants de plusieurs dizaines de millions de m³ ou de retenues de quelques dizaines à centaines de milliers de m³, a déjà fait l'objet de vives controverses. Ces oppositions ont conduit à un net ralentissement des aménagements depuis le début

des années 2000 et à la promotion récente de la concertation entre parties prenantes pour des Projets de Territoires pour la Gestion de l'Eau (PTGE). Ces projets de territoires sont initiés aujourd'hui à l'échelle des bassins correspondant peu ou prou à celle des Schémas D'aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) où se planifie, en concertation, la gestion de l'eau à l'horizon d'une décennie. Les PTGE devraient se fonder sur des exercices prospectifs intégrant le changement climatique, la préservation des écosystèmes, la sobriété des usages et des scénarios pour leurs évolutions, des analyses économiques et financières afin de dimensionner au mieux des aménagements complémentaires (stockage, transferts interbassins). Il en résultera des compromis dont la robustesse sera mise à l'épreuve par la multiplication et l'ampleur des sécheresses à venir, avec leurs conséquences écologiques, économiques et sociales.

De multiples solutions seront mobilisables plus localement pour atténuer les tensions sur la ressource. Les possibilités de recharger artificiellement les nappes alluviales pour soutenir les débits d'étiage restent à préciser. Rejetées jusqu'alors dans le milieu, en se mêlant aux écoulements naturels vers l'aval, les eaux pluviales, grises ou usées pourront être recyclées au plus près de leur lieu de production, après un bilan complet et localisé des coûts et des bénéfices attendus (énergie, qualité des eaux et des sols, hydrologie à l'aval, financier). Le déploiement de tels recyclages sera également tributaire des évolutions des normes sanitaires, qui affectent leur modèle économique et influencent l'acceptabilité sociale. De manière similaire, des analyses localisées des coûts (financiers et environnementaux) et des bénéfices dicteront l'ampleur des projets de dessalement en zone littorale. Mais **en l'état actuel des connaissances, l'ensemble de ces ressources dites non-conventionnelles ne semble pas de nature à répondre à l'enjeu d'équilibre besoins-ressources à l'échelle régionale.**

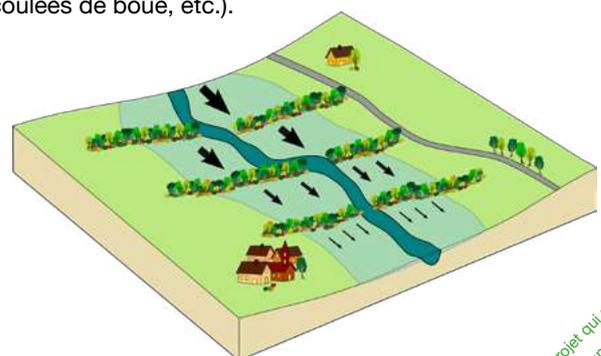
LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Planter des haies brise-crues pour s'adapter au risque d'inondation - 31

SMIVAL - [En savoir plus](#)

La vallée de la Lèze est exposée à des phénomènes récurrents d'inondations par coulées de boue et débordement des rivières. Or, sur la période 1980-2010, près de 300 km de haies ont disparu sur un bassin versant de 350 km², soit un quart du linéaire, dans un contexte d'agriculture majoritairement intensive. Pour lutter contre cette tendance, le Syndicat Mixte Interdépartemental de la vallée de la Lèze (SMIVAL) a mené un projet de plantation de haies brise-crues, situées en fond de vallée ou sur les versants, qui participent à l'interception des ruissellements et réduisent les risques d'inondation en retardant la propagation des pics de crue et en retenant les coulées de boue dans les parcelles pentues. Ces haies sont composées d'une à cinq rangées d'arbres autochtones, d'arbustes ou de buissons adaptés aux conditions locales, clima-

tiques et épidémiques. Supervisé par un Comité technique, le projet a permis de planter 30 km de haies entre 2008 et 2018, en partenariat ou sous maîtrise d'ouvrage du SMIVAL dans le cadre d'une déclaration d'intérêt général, en concertation avec les propriétaires, les agriculteurs, les riverains. Le projet montre une efficacité avérée sur certains sites (limitation des ruissellements, freins aux écoulements, rétention des petites coulées de boue, etc.).



projet qui s'inscrit dans
une logique de
SAIN

Partie USAGES

Les usages anthropiques de l'eau en Occitanie face au changement climatique

Julie FABRE (RECO - consultante)

Les usages et prélèvements en eau en Occitanie aujourd'hui

On classe généralement les usages de l'eau en trois grandes catégories : domestique (eau potable), agricole (en particulier irrigation), industriel ou énergétique. En Occitanie, les prélèvements pour l'eau potable, liés dans le passé récent à une forte croissance démographique sur les zones littorales et en Haute Garonne, et caractérisés par des pics saisonniers importants liés au tourisme, apparaissent stabilisés depuis les années 2000 malgré une croissance démographique dynamique.

Les prélèvements pour l'irrigation, fortement variables dans le temps et dans l'espace, dépendent des dynamiques agricoles locales et, plus récemment, des travaux d'amélioration de l'efficacité (notamment sur les canaux historiques). Les usages de l'eau en Occitanie sont en effet caractérisés par un important patrimoine de canaux aménagés pour le transfert d'eau brute, avec un réseau de 5417 km de « canaux et chenaux », concentrés principalement dans la plaine du Roussillon, l'arrière-pays

languedocien, les terrasses de l'Adour et le Tarn-et-Garonne. Certains canaux ont fait l'objet d'importants travaux de rénovation, induisant une baisse marquée des prélèvements associés mais également des effets connexes liés à la suppression des fuites le long des canaux (dessèchement de milieux humides, baisse de niveaux phréatiques) (Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, Agence de l'Eau Adour-Garonne et Région Occitanie, 2017).

Les usages industriels sont relativement peu développés dans la région. Approximativement, les trois-quarts des volumes prélevés dans le département du Gard sous le libellé « industries et usages économiques » le sont au niveau de la prise d'eau dans le Rhône par la société du Bas-Rhône et du Languedoc, pour une distribution à des usages et localisations variés. L'usage hydro-électrique n'est pas présenté ici, il est abordé dans le **chapitre enjeu Énergie**. Enfin, les prélèvements d'eau à destination de la production d'énergie hors hydro-électricité (non représentés sur la carte) sont peu nombreux dans la région, l'usage principal étant la centrale nucléaire de Golfech dans le Tarn-et-Garonne (**figure 3.6**).

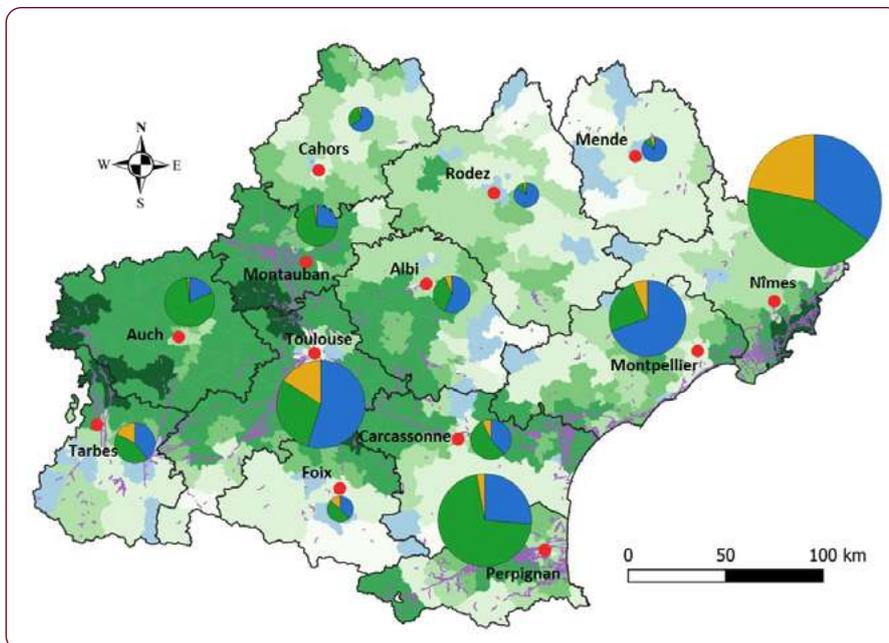
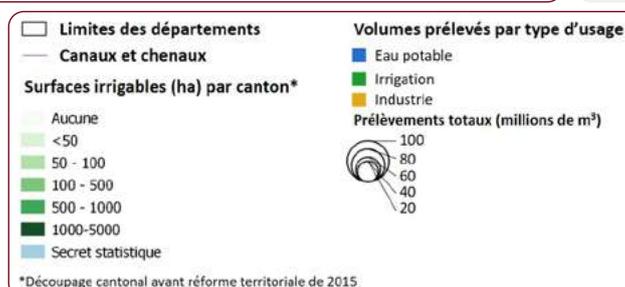


Figure 3.6. Volumes prélevés pour les usages d'eau potable, d'irrigation et d'industries/activités économiques par département selon la Base de données Nationale des Prélèvements en Eau (en ligne), moyenne sur les années 2012 à 2018.

NB : l'importance des prélèvements en eau dans le département du Gard relativement à la région dans son ensemble est due en grande partie par le prélèvement dans le Rhône pour le canal du Bas-Rhône, par la société d'aménagement du Bas Rhône et du Languedoc (BRL).

(Source : Fabre, 2021, carte produite pour le CROCC. Données : Prélèvements : Base de données Nationale des Prélèvements en Eau ; Surfaces irrigables : Recensement Général Agricole 2010)



Prospectives sur les usages de l'eau

Plusieurs exercices de prospective sur l'évolution des usages anthropiques de l'eau ont été menés en Occitanie, dont les projets Vulcain dans les Pyrénées-Orientales, Garonne 2050 et Adour 2050, GICC REMedHE dans le bassin du fleuve Hérault, Aguamod dans le sud-ouest européen, incluant le bassin de la Garonne et des fleuves côtiers méditerranéens, Gard Eau & Climat 3.0, et quelques exercices de prospective à 2030 dans les études sur les volumes prélevables (EVP). Ces dernières ont pour objectif d'évaluer des objectifs quantitatifs en des points de référence pour les eaux de surface et pour les eaux souterraines. Elles fournissent les éléments qui doivent permettre un ajustement des autorisations de prélèvement d'eau dans les rivières ou les nappes concernées, en conformité avec les ressources disponibles et sans perturber le fonctionnement des milieux naturels. Elles précèdent une concertation qui doit aboutir à la réalisation de plans de gestion de la ressource, comprenant des actions de réduction des prélèvements d'eau.

Aucune tendance généralisable ne se dégage de l'ensemble de ces exercices de prospective. Il est néanmoins intéressant d'étudier les grands facteurs déterminants des demandes en eau et leurs poids relatifs dans les scénarios prospectifs. Ceux-ci sont multiples, contrastés au sein du territoire de l'Occitanie, et particulièrement incertains.

À partir des travaux de [Rinaudo et Neverre \(2019\)](#) et des éléments issus des différentes études prospectives sur les demandes en eau (projet Vulcain, Garonne 2050, Stratégie Eau & Climat 3.0 du département du Gard), la **figure 3.7** récapitule, pour les demandes en eau potable et d'irrigation, les principales composantes intervenant dans leur calcul, et les facteurs influençant ces différentes composantes. De nouveaux usages liés au rafraîchissement des villes (végétalisation, brumisateurs, etc.) sont également à prévoir mais sont difficilement quantifiables. Concernant les usages industriels et pour la production d'énergie, peu de données de projection sont disponibles, et les travaux existants considèrent généralement une demande stable ou en baisse (amélioration des procédés) dans les scénarios tendanciels.

Si un impact net du changement climatique sur les besoins en eau pour l'irrigation est à noter (hausse des besoins due à l'augmentation de l'évapotranspiration), de nombreux autres facteurs auront un poids similaire dans l'évolution de la demande et des prélèvements en eau agricole. Ainsi sur le bassin versant de l'Hérault, dans le secteur du canal de Gignac, la demande en eau d'irrigation pourrait augmenter de 11 à 48 % du fait du changement climatique seul, à horizon 2050. En revanche, en ajoutant au changement climatique un scénario tendanciel d'évolution des surfaces irriguées (+65 %) et de nette amélioration de l'efficacité de la gestion du canal et des modes d'irrigation, la demande pourrait baisser de 21 à 39 % en été ([Grouillet et al., 2015](#)).

	Composantes	Facteurs d'influence	Évolutions tendancielles
	Rendements des réseaux		Amélioration, plafonnement
	Population	Fréquentation touristique Aménagement, politique d'accueil et de développement du territoire Climat	Incertitudes Scénario tendanciel 7 millions d'habitants en Occitanie en 2050
	 Demande unitaire	Revenu des ménages ^a Taux d'équipement en appareils hydro-économes Nouveaux usages (jacuzzis, douches multi-jets...) Densification ou étalement urbain Culture de l'eau des ménages Comptage individuel Climat ^b	Incertitudes Hausse Hausse Contrastes territoriaux Sensibilisation croissante Généralisation
	Climat Assolements (types de cultures, calendriers) Surfaces irriguées Pratiques d'irrigation	R&D Choix de consommation et politiques alimentaires locales Prix Politiques de soutien (européennes à locales) Niveau d'intervention des pouvoirs publics Politiques court-termistes vs durables Adaptation des itinéraires techniques	Vers des variétés et des pratiques moins consommatrices Incertitudes

Figure 3.7. Principales composantes des demandes en eau domestique et d'irrigation et leurs facteurs d'influence.

Les facteurs en rouge (vert) sont positivement (négativement) corrélés à la demande ; les facteurs en gris ont une influence indirecte et peuvent induire une baisse ou une hausse de la demande.

(Source : Fabre, 2021, à partir des travaux de Rinaudo et Neverre, 2019 et des éléments issus des différentes études prospectives sur les demandes en eau (projet Vulcain, Garonne 2050, Stratégie Eau & Climat 3.0 du département du Gard))

a) En moyenne, une augmentation du revenu de 10 % génère une hausse de la consommation de 4 %

b) Si le climat semble avoir un impact limité sur les usagers des zones urbaines denses (pas de jardin, ni de piscine), la demande des usagers en maisons individuelles pourrait augmenter de l'ordre de 10 % avec le changement climatique (menant à une hausse de 4 à 5 % de la demande totale pour des agglomérations telles que Montpellier ou Perpignan). A noter néanmoins que la hausse serait concentrée en été et pourrait augmenter le pic de consommation.

Les équilibres besoins-ressources et les options d'adaptation envisagées pour les usages

Les travaux réalisés à ce jour ont pour principal objet le partage des volumes d'eau disponibles entre les différents usages et le respect des débits environnementaux, lesquels sont définis comme une valeur imposée réglementairement afin de préserver un écoulement minimum dans un cours d'eau pour assurer les services qui en dépendent (Garonne 2050, les EVP, REMedHE...). Ils montrent des difficultés, dès l'horizon 2050 voire 2030, à conjuguer satisfaction des demandes et respect des débits environnementaux (figure 3.8). Certains travaux s'intéressent également à l'impact socioéconomique de l'insatisfaction des demandes en eau, comme le projet Aguamod, avec le calcul d'indicateurs tels que la productivité de l'eau des secteurs primaire, secondaire et tertiaire (résultats non publiés à ce jour).

Si des travaux approfondis sur le potentiel d'amélioration des équilibres besoins-ressources par l'adaptation des usages sont rares, **quelques études ont montré que seule une combinaison de mesures ambitieuses découplant demandes en eau et développement territorial pourrait résorber les déficits à moyen terme**

(Fabre et al., 2016). Dans les scénarios tendanciels de demande en eau, les améliorations de rendements et d'efficacité de l'irrigation sont généralement considérées comme étant le maximum économiquement faisable. Ce sont donc d'autres mesures de gestion de la demande qui gagneraient à être étudiées comme les pratiques d'irrigation, l'amélioration de la rétention en eau des sols, la baisse de la consommation d'eau des ménages (équipements et comportement hydro-économiques, jardins méditerranéens), ou encore des mesures plus structurantes comme l'évolution des assolements et de l'intensivité en eau de l'agriculture, la densification de l'habitat, etc.

Enfin, il paraît indispensable de travailler à une connaissance fine des usages et de leur vulnérabilité au manque d'eau (quels besoins pour quels usages ? Quel impact économique, social, politique, territorial du manque d'eau ? Quelles alternatives possibles, quels soutiens publics envisageables pour modifier les usages ?), ainsi que des flux d'eau au sein des bassins versants (relations amont-aval, retours au milieu et usages/milieus en dépendant, liens entre les flux d'eau bleue et d'eau verte, etc.) afin d'alimenter une concertation ambitieuse autour d'une répartition des usages de l'eau en ligne avec des objectifs territoriaux partagés.

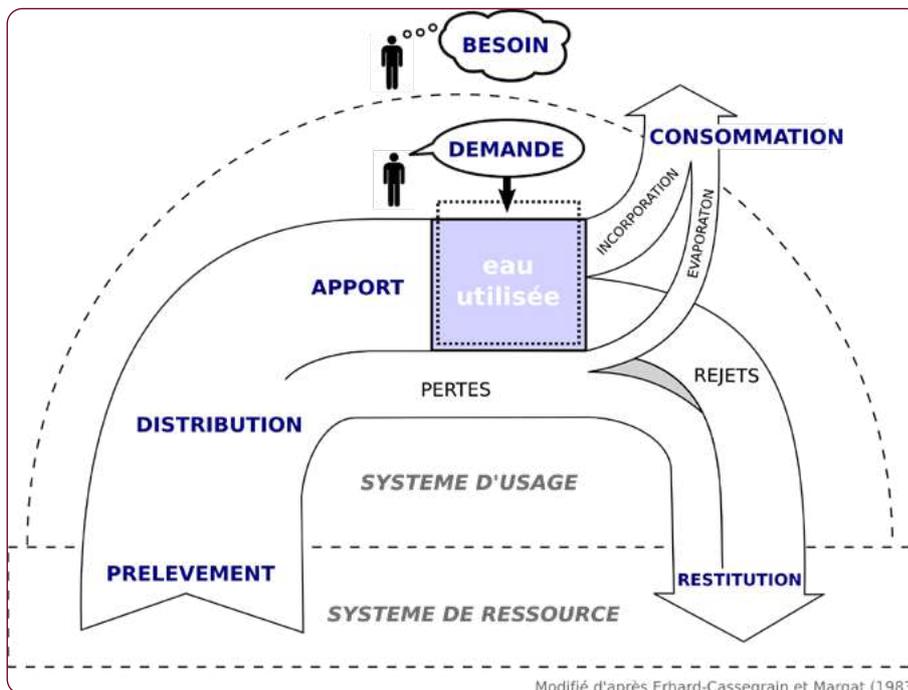


Figure 3.8. Étapes du cycle d'usage de l'eau (cas général d'un usage ex-situ). (Source : Calianno et al., 2017)

Quelques définitions

On entend ici par usage de l'eau une catégorie d'emploi d'eau, classée selon l'objectif voulu. On peut distinguer les usages ex-situ, qui détournent l'eau du milieu naturel et dans lesquels les actions de prélèvement et de restitution sont séparées dans l'espace et dans le temps, des usages in situ, qui ne détournent pas l'eau du milieu naturel, mais utilisent sur place certaines de ses fonctions. Nous proposons ici le schéma de Calianno et al. (2017) pour clarifier les termes relevant des usages ex-situ. Le système de ressources est entendu comme « les réserves d'eau disponible d'un point de vue technique et économique dans le milieu naturel ». À noter que l'eau utilisée peut être inférieure à la demande. NB : l'eau bleue est celle qui transite rapidement dans les cours d'eau, les lacs, les nappes phréatiques, et dans les réseaux d'adduction après prélèvement. L'eau verte est stockée dans le sol et la biomasse et l'eau bleue est transformée en eau verte par l'irrigation.

Partie RISQUES

Risques quantitatifs

Yves TRAMBLAY (IRD - HSM), Freddy VINET (UPV - LAGAM), Alexandre BRUN (UPV - LAGAM)

Le réseau hydrographique et les régimes hydrologiques de surface en Occitanie sont particulièrement variés. Pour l'usage de cette synthèse, nous considérerons deux grands ensembles hydrographiques.

A l'ouest, celui de la Garonne et de ses affluents (Lot, Tarn...) qui conflue avec la Dordogne en Gironde avant de rejoindre l'Atlantique (Faucéa, 2020). Dans sa partie pyrénéenne, c'est une rivière torrentielle avec un régime pluvio-nival marqué. La fonte des neiges engendre de forts débits au printemps tandis que la période d'étiage commence avec les premières neiges dès l'automne. Dans la plaine toulousaine et plus en aval, les écoulements de la Garonne sont fortement modifiés par les apports des affluents de régime pluvial. Les crues du fleuve résultent alors des pluies de longue durée sur l'ensemble du bassin versant. À Toulouse, son débit durant la crue du 23 juin 1875 atteint environ 7000 m³/s, soit 36 fois le débit moyen annuel.

A l'est de l'Occitanie, une dizaine de fleuves côtiers se jettent dans la Méditerranée. La plupart descendent des Cévennes ou de l'arrière-pays héraultais (Vidourle, Lez, Hérault, Orb...). D'autres, plus à l'ouest, ont leurs sources dans les Pyrénées (le Tech, la Têt et l'Aude). Dans les deux cas, leur régime est méditerranéen. La période des hautes eaux qui s'étale de septembre à décembre est caractérisée par des épisodes extrêmes à l'origine de fortes inondations. Par exemple, les crues de l'Aude survenues en octobre 2018 causent la mort de 14 personnes et suscitent l'émotion de toute la nation. Celles du Vidourle et des Gardons, en 2002, violentes et meurtrières, précipitent la mise en œuvre d'un programme d'actions de prévention des inondations.

Dans toute la région Occitanie, le changement climatique risque d'accentuer la durée et l'intensité des étiages, déjà sévères. L'augmentation de la température moyenne surtout au printemps et en été (+2,4 °C en août à Montpellier entre la période 1951-1980 et 1991-2020) accentue l'évapotranspiration, ce qui réduit l'humidité des sols et donc le ruissellement de surface (Dayon et al., 2018). Les scénarios existants indiquent une possible augmentation de la durée des périodes d'étiages, de l'ordre de +10 % à +35 % selon les scénarios climatiques de +1,5 °C à +3 °C (Tramblay et al., 2020). La diminution de la durée d'enneigement en moyenne montagne et le retrait des glaciers pyrénéens prive déjà les cours d'eau de ressources hydriques en saison chaude et les changements climatiques en cours induisent une transition d'un régime nival vers un régime pluvial. Ces changements combinés induisent une baisse très marquée notamment pour la Garonne (Onerc, 2011).

Alors même que la proportion de cours d'eau intermittents est de 56 % sur les versants méditerranéens et de 46 % côté Garonne, **des rivières aujourd'hui pérennes deviendront intermittentes avec une plus forte fréquence** des assèchs notamment durant la période estivale de juin à septembre (Tramblay et al., 2021b). Ce risque accru de sécheresses hydrologiques aura nécessairement des conséquences sur les usages de l'eau, notamment durant la période estivale avec une forte fréquentation touristique.



Figure 3.9. Crue du Lez à Montpellier. (Source : F. Vinet, 2014)

Concernant les crues, malgré une augmentation observée de l'intensité des épisodes de précipitations intenses, on ne retrouve pas de hausse généralisée dans les données de débits. Cette augmentation de l'intensité de pluies est de l'ordre de 20 % ces dernières décennies, et les scénarios climatiques récents suggèrent que cette hausse va se poursuivre dans le futur (Tramblay et al., 2021a). **Les principaux impacts attendus sont liés à une augmentation des ruissellements de surface, plus importants dans des bassins versants plus artificialisés que jadis.** En revanche pour les crues fluviales (débordements de cours d'eau), on observe plutôt une diminution de la fréquence des crues, notamment les plus modérées (Sauquet et Lang, 2017 ; Tramblay et al., 2021a ; Di Sante et al., 2021). Cette diminution est attribuée à la baisse de l'humidité des sols à l'échelle des bassins, qui compenserait la hausse des précipitations extrêmes (Tramblay et al., 2019), les conditions initiales de saturation des sols en début d'épisode de crue étant en effet en mesure de moduler très fortement l'amplitude de ces dernières dans les bassins du sud de la France.

Les scénarios hydrologiques établis à l'échelle européenne indiquent que cette baisse observée des crues fluviales devrait se poursuivre dans les différentes trajectoires de climat pour la moitié sud de l'Europe.

Néanmoins il n'existe pas à l'heure actuelle de scénarios spécifiques sur l'évolution des crues dans les bassins d'Occitanie, et il demeure une forte incertitude pour les petits bassins qui sont à l'origine de crues dévastatrices (par exemple les crues de l'Aude en 2018 ont été générées par des petits bassins comme l'Orbieu, Fresquel, Trapel et l'Orbiel).

De tels travaux à une échelle régionale sont nécessaires pour comprendre la réponse hydrologique de différents

types de bassins (agricoles, urbains, de montagne...) face à des modifications à la fois du climat et de l'occupation des terres. **Néanmoins, ces résultats sur l'évolution récente des crues sont à mettre en perspective avec l'augmentation de la vulnérabilité face à ces épisodes, ce qui suggère que la gestion des extrêmes hydrologiques dépend aujourd'hui moins des effets du réchauffement climatique que de l'aménagement des territoires.**

Impacts du changement climatique sur la qualité des eaux en Occitanie

Françoise ELBAZ POULICHET (CNRS - HSM)

Le bon état écologique d'une masse d'eau tel que défini par la Directive Cadre sur l'Eau (DCE), correspond à un bon fonctionnement au niveau biologique, physique, chimique et sanitaire. La composition chimique et la diversité biologique des espèces dépendent de facteurs naturels comme la géologie, le climat, le couvert végétal et varient saisonnièrement en fonction des conditions hydrologiques, de l'ensoleillement, de la température. Aujourd'hui les facteurs humains comme l'occupation des sols (agriculture, urbanisation, industrie, activité extractive), la pêche, l'aquaculture sans oublier les capacités de traitement des effluents dominent largement les facteurs naturels et contrôlent dans une large mesure la qualité des eaux. Le changement climatique constitue une pression supplémentaire qui impacte à la fois les facteurs naturels et les facteurs humains.

Dans la littérature scientifique, rares sont les publications qui à ce jour rapportent des impacts observés du changement climatique sur la qualité des eaux. Cela ne veut pas dire qu'ils n'existent pas mais ils sont difficiles à distinguer, oblitérés par les impacts des pressions anthropiques. Par ailleurs, les modèles prévoyant les impacts du changement climatique sont rares et surtout spécifiques à chaque site. Les éléments nutritifs (azote et phosphore) apportés en excès par l'activité humaine (agriculture, rejets urbains) provoquent une eutrophisation des milieux aquatiques qui se traduit notamment par des proliférations de plantes aquatiques, algues et cyanobactéries. Avec un ensoleillement accru, le changement climatique peut contribuer à augmenter la photosynthèse (croissance des algues). La décomposition de ces algues consomme de l'oxygène et entraîne parfois des crises d'anoxies (absence d'oxygène). La solubilité de l'oxygène dans l'eau diminuant avec l'augmentation de la température, ces crises d'anoxies connues sous le nom de malaïgue dans l'étang de Thau où elles occasionnent des pertes conchylicoles considérables pourraient voir leur fréquence augmenter (voir **chapitre-enjeu Milieux littoraux**).

Des suivis de la qualité des eaux publiés récemment ont néanmoins montré que dans la plupart des étangs littoraux d'Occitanie, la qualité de l'eau s'est améliorée ou s'est stabilisée (Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse, 2021). Dans la lagune de Thau (Derolez et al., 2020) et dans la Loire (Minaudo et al., 2015), l'augmentation des températures n'a pas eu

d'effet sur les crises d'anoxies depuis 2 à 3 décennies. Ces dernières ont régressé en raison de la diminution des rejets domestiques de phosphore, conséquence de la mise en œuvre après les années 1970 de législations nationale et européenne qui ont généralisé et amélioré le traitement des effluents urbains. Il semblerait donc que l'action de l'homme ait permis de limiter l'impact du réchauffement au moins sur cette période.

En revanche, l'augmentation de la température, la durée des épisodes de chaleur et peut-être paradoxalement l'amélioration de la qualité des eaux via la diminution des rejets de phosphore par rapport à ceux d'azote pourraient stimuler le développement d'algues ou de cyanobactéries toxiques ou leur sécrétion de toxines dans les milieux d'eaux douces et marins côtiers (Aubé et al., 2016 ; Pinay et al., 2017). Cependant, l'importance relative des différentes variables clés dans les développements d'algues toxiques (**figure 3.10**) est encore mal connue (Wells et al., 2015). Outre la prolifération des algues toxiques, l'augmentation de la température pourrait également favoriser l'apparition ou la prolifération de germes pathogènes pour l'homme notamment ceux responsables d'infections digestives (gastroentérovirus et vibrio cholérique) (Estève et al., 2015) ou pour les organismes aquatiques particulièrement dans les élevages (voir **chapitre-enjeu Santé**).

Le changement climatique aura également pour effet des étiaages sévères et prolongés. Dans ces conditions les rejets ponctuels d'effluents urbains et industriels et diffus de l'agriculture ne seraient plus dilués et les concentrations en métaux, pesticides, médicaments, etc. pourraient dépasser les valeurs limites fixées par la DCE pour une bonne qualité des eaux. A l'inverse, les épisodes pluvieux bien que moins fréquents pourraient être plus violents ou plus étendus que par le passé. **Les crues pourraient en particulier mobiliser les polluants (métaux, arsenic) contenus dans les stériles des anciennes mines en particulier sur les bassins des Gardons et de l'Aude (Salsigne).** Il est important de garder en mémoire que lors de ces épisodes pluvieux violents des quantités importantes de polluants (pesticides et éléments nutritifs épandus sur les sols agricoles, eaux usées non traitées) et de déchets de toute nature (matières plastiques, macro déchets) rejoignent les milieux côtiers.

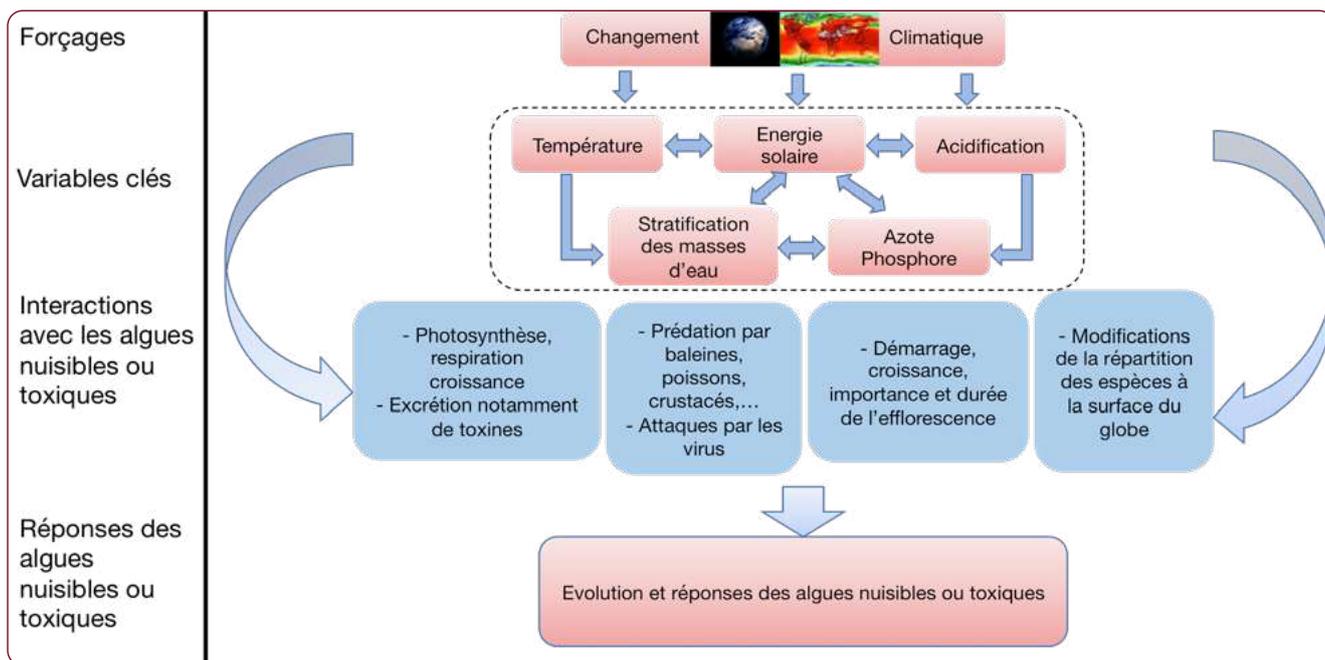


Figure 3.10. Schéma conceptuel montrant l'impact du changement climatique sur les variables clés des milieux aquatiques et les interactions avec les algues toxiques ou nuisibles qui peuvent conduire à des proliférations. (Source : d'après Wells et al., 2015).

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Risq'O : des indicateurs multi-échelles pour connaître le risque d'inondation sur son territoire - 11

Alisé Géomatique - En savoir plus

Comment limiter l'exposition aux aléas actuels et d'ici 2050 ? Comment et où densifier la ville, tout en limitant l'imperméabilisation ? Quelles infrastructures vertes sont à préserver, ou à créer ? Risq'O répond à ces questions et constitue un appui aux politiques publiques pour s'engager vers cette résilience climatique et mieux se projeter face à ces aléas. Le Conseil départemental de l'Hérault, le Syndicat Mixte des Milieux Aquatiques et des Rivières, l'agglomération de Carcassonne, le Service Départemental d'Incendie et de Secours de l'Aude et les services de l'État dans le département ont souhaité participer à cette démarche innovante, portée par Alisé Géomatique.

Risq'O, par sa conception et la qualité des données, facilite l'accès à des indicateurs robustes, de la parcelle au grands bassins versant. Cartes et tableaux de bord donnent accès à :

- une connaissance fine de l'aléa débordement et ruissellement (multimodèle du GIEC) ;
- à la vulnérabilité des biens et personnes et à l'exposition du potentiel foncier ;
- aux leviers d'actions : désimperméabilisation, infrastructures écologiques ou « SfN », qui offrent des éco-fonctionnalités recherchées (régulation d'écoulement, diminution des polluants, atténuation des îlots de chaleur).

Risq'O

Alisé géomatique, l'intelligence territoriale au cœur de notre métier.

risqo@alisse-geomatique.fr
www.alisse-geomatique.fr/risqo/

POUR UNE URBANISATION RÉSILIENTE FACE AU RISQUE D'INONDATION.

Partie GOUVERNANCE

Le grand cycle (ressources, milieux, risques)

Stéphane GHIOTTI (CNRS - ArtDEv) et Sophie RICHARD (AgroParisTech - G-EAU)

La gouvernance du grand cycle de l'eau au sein des territoires d'Occitanie est tributaire de la capacité de l'ensemble des acteurs à faire évoluer un réseau historiquement structuré, afin de s'insérer à un nouvel environnement juridico-politique intégrant les enjeux du changement climatique.

Du développement des espaces ruraux agricoles et de l'hydroélectricité à l'intégration des enjeux écologiques et à l'adaptation aux changements climatiques

La gouvernance des différents ouvrages de transfert et de stockage d'eau et les maîtrises d'ouvrage publiques associées ont évolué au fil du temps pour répondre aux nouveaux enjeux de gestion de l'eau et de développement économique. Les institutions sectorielles initiales de gestion des infrastructures comme les deux sociétés d'aménagement régional créées par l'État au milieu des années 1950 (Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne – CACG - et le système Neste à l'ouest ; Compagnie du Bas-Rhône Languedoc – BRL - et le canal Philippe Lamour à l'est) ont dû, plus ou moins progressivement, prendre en considération des problématiques plus intégrées et intersectorielles comme la question environnementale, pluri-acteurs, mobilisant de nouveaux instruments de l'information, de la prospective et de la participation.

Les controverses récurrentes et hautement conflictuelles sur les ouvrages de stockage sont aujourd'hui exacerbées par les perspectives de changement climatique qui questionnent plus fortement l'opportunité et l'efficacité de ce modèle de développement des espaces ruraux et de son mode de gouvernance initial, plutôt sectoriel. Aujourd'hui la gouvernance de ces ouvrages intègre en effet des problématiques beaucoup plus larges alliant qualité des milieux, biodiversité, lutte contre les inondations...

Une décentralisation accrue avec des institutions régionales qui entrent dans le jeu

Une des principales évolutions de la gouvernance régionale ces dernières années est la reprise en 2008 de la concession des ouvrages hydrauliques du réseau BRL par le Conseil Régional Languedoc-Roussillon (Barraqué, 2007 ; Ghiotti, 2021). Cependant, malgré les défis auxquels elle fait déjà face et ce que laisseraient supposer ses orientations récentes (H2O 2030, Plan d'orientation régional pour l'eau de 2018), la Région Occitanie n'a pas encore répété l'opération pour la CACG et, contrairement à d'autres Régions de France, ne s'est pas encore

positionnée pour demander la mission « d'animation et de concertation pour la gestion de la ressource en eau et des milieux aquatiques » prévue par l'article 12 de la Loi NOTRe (2015). Ce dernier volet de la réforme territoriale, avec la loi MAPTAM (2014), redistribué les cartes entre les différents acteurs en changeant partiellement les niveaux d'exercice des compétences liées au grand cycle de l'eau (Barone et al., 2018).

Un système multi acteurs en recomposition sous l'effet des lois de décentralisation de 2014 et de 2015

La Région n'est pas le seul acteur concerné par ces enjeux qui se déclinent également aux échelles supra-régionales (réformes de l'État, Agences de l'Eau, Office Français de la Biodiversité) et infra-régionales. Ils concernent notamment les autres collectivités territoriales (départements et communes), les intercommunalités à fiscalité propre et les syndicats de bassin versant (figure 3.12).

A l'échelle départementale, les conseils départementaux ont été et sont toujours très structurants pour la gestion territoriale de l'eau que ce soit aux côtés des communes et des organisations professionnelles agricoles comme « fer de lance » de projets d'infrastructures hydrauliques ou en appui à la structuration de syndicats mixtes, porteurs des démarches de contrats de rivières ou de schémas d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE) à l'échelle des bassins versants, avec les services déconcentrés de l'État et l'Agence de l'Eau.

La région Occitanie est positionnée à cheval sur deux bassins hydrographiques (Adour-Garonne et Rhône-Méditerranée) aux enjeux quantitatifs assez différents, notamment sur les volets agricole et hydroélectrique. En termes de politique de gestion quantitative, le poids d'acteurs comme EDF est central à l'échelle de la région comme en témoigne, par exemple, son rôle dans la définition des débits d'objectifs d'étiage sur la Garonne ou sur d'autres bassins versants. Les Agences de l'Eau sont des acteurs importants des futurs dispositifs par leurs priorités de financement visant à réduire et à s'adapter aux effets du changement climatique ainsi que par leur implication dans la structuration des gouvernances territoriales. Le bloc communal constitue un autre acteur majeur, au-delà de son implication historique sur l'alimentation en eau potable et l'assainissement comme en témoigne son rôle central dans la mise en œuvre de la compétence gestion des milieux aquatiques et prévention des inondations (GEMAPI) et le prélèvement de la taxe associée visant son financement.

Si cette nouvelle attribution renforce l'intégration des enjeux entre petit et grand cycles de l'eau à l'échelon inter-communal, elle participe également à la mise en tension des relations construites par cet échelon avec les établissements de bassin, ces derniers ayant été structurés historiquement autour de la prise en charge de ces problématiques.

Cette diversité d'acteurs et d'échelles touche également l'État (services déconcentrés et centraux) et ses opérateurs (Agences de l'Eau, Office Français de la Biodiversité, Conservatoire du Littoral...) et l'interroge dans sa capacité de coordination et de mise en cohérence avec les politiques sectorielles.

Enjeux et défis à venir pour innover avec le changement climatique

En contexte de changement climatique et d'incertitudes multiples, **un enjeu pour les différentes institutions est d'innover et d'inventer de nouvelles modalités de gestion et de gouvernance, adaptées à une nouvelle répartition spatiale et temporelle des ressources en eau.**

Ces questions se posent en termes de pouvoir, de légitimité, de compétences, de moyens (techniques, financiers, opérationnels) en réponse à une nouvelle répartition spatiale et sociale des coûts et des bénéfices tout en prenant en compte les questions de solidarités, inter-territoriales mais aussi inter-sectorielles et inter-générationnelles (Richard et Rieu, 2017).

Le changement climatique questionne la gouvernance sous trois dimensions en particulier :

- 1) La capacité à favoriser des cadres qui permettent la coordination de territoires et d'échelles variables (comme l'AGORA en région Sud-PACA, le guichet unique pour le volet financier en Bretagne) ;
- 2) La capacité à coordonner des secteurs et des acteurs multiples, de plus en plus interdépendants d'une ressource commune qui évolue : eau potable, biodiversité, irrigation, inondation, sécheresse... ;
- 3) La capacité à articuler gestion des urgences et projection sur le temps long et à gouverner en contexte d'incertitudes.

Imaginer un système de gouvernance à l'échelle régionale en contexte de changement climatique revient ainsi à imaginer des formes d'innovations. **En Occitanie, à la régionalisation « hydraulique » de la période précédente succède une nouvelle phase où s'affirment tendanciellement l'écologisation, la démocratisation et l'intégration des effets et des enjeux du changement climatique.** La gouvernance du grand cycle de l'eau en contexte de changement climatique en Occitanie, encore en phase de construction, se trouve à un tournant (voir **chapitre-enjeu Gouvernance**).

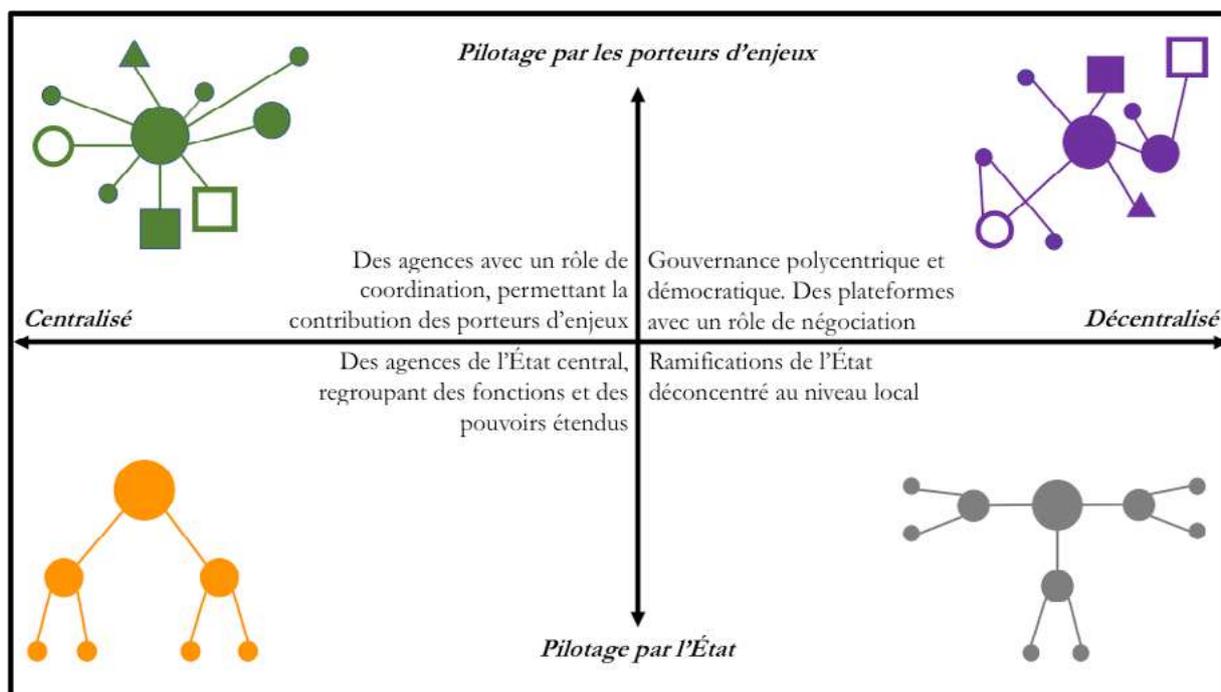


Figure 3.12. Typologie de gouvernance par bassin versant (Source : Molle et al., 2007)

Services d'eau et d'assainissement : faire tomber les limites du petit cycle

Marine COLON (*AgroParisTech - G-EAU*), Lætitia GUÉRIN-SCHNEIDER (*INRAE - G-EAU*)

Pendant longtemps, la gestion des ressources (grand cycle de l'eau) et des services d'eau (petit cycle) relevaient d'échelles et d'acteurs distincts. Le petit cycle recouvre les réseaux d'eau potable et d'assainissement. Il est placé sous la responsabilité des élus locaux (communes et intercommunalités) et se structure autour du triptyque élus (organisateur), opérateur (gestionnaire) et abonnés (usager payeur).

L'État quant à lui fixe et contrôle l'application des règles. Il a longtemps contribué au financement des réseaux, rôle désormais confié aux Agences de l'Eau.

L'enjeu des services portait initialement sur l'accès à l'eau (raccordement au réseau). Il s'est déplacé vers la qualité des ressources, générant un premier pont entre petit et grand cycle : la maîtrise des pollutions diffuses ou la fixation des exigences de rejets des stations d'épurations se raisonnent à l'échelle de la masse d'eau ([Deutsch et Gautheron, 2013](#)).

Le changement climatique accentue encore les tensions quantitatives à une plus large échelle. La gestion quantitative passe d'un registre technique (construire des infrastructures d'accès à l'eau) à un registre de gouvernance (organiser le partage de l'eau entre les usages) ([Colon et al., 2018](#)).

Quels sont, dans ce contexte, les enjeux et les pistes d'évolutions en France et plus particulièrement en Occitanie ?

Agir au sein du petit cycle

La loi NOTRe incite les services à se regrouper pour augmenter leur échelle de gestion. Cela ouvre des perspectives de solidarité territoriale via des interconnexions (augmentation de l'offre en eau). Côté demande, la tarification incitative (le prix au m³ augmente avec la consommation) est de plus en plus souvent envisagée pour limiter les consommations. Ainsi, par exemple, Montpellier Méditerranée Métropole pratique un tarif croissant avec deux tranches pour l'eau potable.

L'adaptation au changement climatique implique aussi de changer les référentiels d'action utilisés dans les schémas directeurs d'eau potable (risques de moindre disponibilité de l'eau, de plus de salinité avec la remontée des nappes salines...) et, côté assainissement, de prendre en compte la possible modification des exutoires (intermittence accrue des cours d'eau côtiers) ou l'évolution des zones inondables.

Articulation avec le grand cycle

Penser les solutions à l'échelle « grand cycle » c'est aussi développer des ressources alternatives, pour réserver l'eau potable aux usages les plus exigeants en qualité (eau de boisson, usages sanitaires) : l'accès aux réseaux d'eau brute, initialement destinés à l'irrigation agricole, peut parfois répondre à des besoins urbains (arrosage des espaces verts et jardins). Côté assainissement, la réutilisation des eaux usées permet quant à elle un recyclage des eaux urbaines vers l'irrigation, ce qui peut être intéressant en zone littorale, lorsque les stations rejettent la précieuse eau douce en mer sans jamais soutenir l'étiage de cours d'eau (comme à Montpellier ou Sète).

Penser « grand cycle » c'est également, promouvoir une gouvernance élargie via les SAGE (schéma d'aménagement et de gestion des eaux). Cela permet à la fois d'envisager la gestion des services à une échelle plus vaste, celle de la ressource et d'impliquer un panel plus large d'acteurs. Ainsi le SMETA (syndicat mixte d'études et de travaux de l'Astien) a créé en 2013 une charte et une labellisation pour encourager les économies d'eau dans le petit cycle.

Une gestion plus transversale du territoire

De manière encore plus transversale, une partie des solutions pour s'adapter aux nouveaux enjeux viendra de la transversalité entre gestion de l'eau et gestion des territoires. La loi a déjà commencé à inverser la logique en donnant au document SAGE un poids supérieur à celui des documents d'urbanisme. **Au moins en théorie, ce n'est plus le développement urbain qui ordonne la mise en place des réseaux, mais la disponibilité des ressources et leur possible rareté future qui conditionnent les développements.**

En conclusion, l'adaptation au changement climatique mobilise de multiples leviers, techniques, économiques, politiques (avec la gestion concertée). Il est intéressant de combiner les solutions mais aussi de changer de paradigme pour sortir du petit cycle. Au final, un accroissement de la rareté de l'eau pourrait peser sur le prix de l'eau potable, même si les investissements ne sont pas les seuls facteurs explicatifs du prix final. Cette augmentation sera d'autant plus forte si les consommations ne sont pas maîtrisées, obligeant à aller chercher l'eau toujours plus loin à force d'infrastructures coûteuses. Le changement climatique amènera également à réfléchir au modèle de fourniture des services par le réseau, pour une plus grande circularité et pour des dispositifs moins consommateurs d'eau et d'énergie.

Encadré 3. A. Le Canal du Midi et ses extensions

Pierre CHEVALLIER (IRD - HSM)

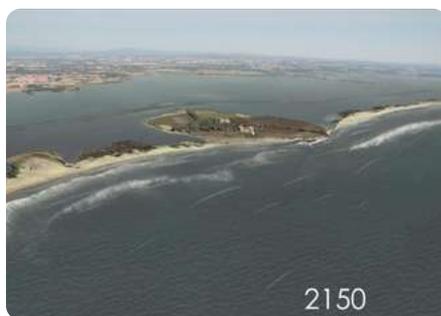
Le Canal du Midi, construit à la fin du XVII^e siècle, traverse la région Occitanie d'est en ouest avec ses deux extensions qui datent de la première moitié du XIX^e siècle, le Canal du Rhône à Sète et le Canal de Garonne. Si la fonction originale d'axe de transport reliant la Mer Méditerranée à l'Océan Atlantique est devenue anecdotique, il constitue un ensemble majeur dans l'environnement occitanien par son importance hydraulique, sa présence paysagère, son rôle touristique et sa valeur patrimoniale avec sa partie la plus ancienne inscrite au Patrimoine Mondial de l'UNESCO (1996).

Son bon fonctionnement est directement lié aux conditions environnementales et dépend de plusieurs facteurs sensibles aux évolutions climatiques des prochaines décennies. La partie centrale (Canal du Midi) est alimentée par des retenues situées dans la Montagne Noire sur le bassin hydrographique du Tarn ; le réservoir historique de St Ferréol est complété aujourd'hui par trois autres (les Cammazes, la Galaube et le Lampy Neuf). La partie est (Canal du Rhône à Sète) traverse les étangs littoraux méditerranéens. La partie ouest (Canal de Garonne) est connectée à la Garonne par des prises d'eau, tout particulièrement celle du canal de Brienne à Toulouse qui se trouve au point le plus haut. Cet ensemble est donc directement tributaire des deux régimes hydrologiques distincts de la Garonne amont et du Tarn, ainsi que de l'évolution du niveau de la mer et du trait de côte méditerranéen.

Selon l'agence de tutelle, Voies Navigables de France, on ne dispose pas aujourd'hui d'étude scientifique détaillée de l'impact du changement climatique sur l'alimentation du Canal du Midi et du Canal de Garonne. Pour le Canal du Rhône à Sète, directement menacé par l'élévation du niveau marin et le recul du trait de côte, un document récent (février 2021) de la Préfecture Régionale d'Occitanie fait le point sur son devenir. Il prend en particulier en compte des simulations réalisées par l'Entente Interdépartementale pour la Démoustication du littoral méditerranéen (EID) et le Conservatoire du Littoral qui soulignent une forte vulnérabilité du canal au cours des prochaines décennies et sa disparition à l'échéance de 2150, en l'absence d'intervention radicale.



2015



2150

Figure 3.11. Simulation de l'évolution du Canal du Rhône à Sète dans sa traversée des étangs de l'Arnel et du Prévost au sud de Montpellier ; au centre l'île et la cathédrale de Maguelone. (Source : présentation de l'EID Méditerranée et du Conservatoire du Littoral, 6/11/2020)

Les menaces et leur cohorte de conséquences économiques qui pèsent sur cet ensemble emblématique ne sont pas que d'ordre hydraulique. Des perturbations biologiques liées au réchauffement sont aussi susceptibles d'endommager l'environnement du canal, comme l'ont montré les atteintes observées au cours de la dernière décennie aux plantations de berge (chancre coloré du platane).



CHAPITRE

4

SANTÉ

Coordination : Virginie HUGUES

Rédaction : Jean-Pierre ALESSANDRI, Marie Josèphe AMIOT-CARLIN, Agathe ANDRE-DOUCET, Jean-Luc ATTIE, Michel BACOU, Thierry BALDET, Geneviève BRETAGNE, Maryline CANNOU SPECHT, Mathieu CASTETS, Nicolas CATALA, Marie DEMARCHI, Gérard DUVALLET, Isabelle ESTEVE-MOUSSION, Claude GRISON, Virginie HUGUES, Béatrice JOSSE, Renaud MARTI, Laurent POUMARAT, Eric POURTAIN, Alaa RAMDANI, Michel SACHER, Annelise TRAN, Ghislaine VERRHIEST-LEBLANC, Chantal ZAOUCHE GAUDRON.

Santé et changements climatiques : histoire, relations et conséquences

Virginie HUGUES (*consultante*)

Les changements climatiques sont des phénomènes complexes dont les effets, multiples et interconnectés, impactent les milieux, naturels et anthropisés, les ressources, et les activités économiques. Le secteur de la santé n'est pas épargné car les changements climatiques ont des conséquences en termes de santé physique des individus, par les vagues de chaleur, l'apparition de zoonoses, les sécheresses et pressions sur les ressources naturelles etc., mais aussi de santé mentale, par l'apparition de stress post-traumatiques suite à des événements extrêmes, ou encore par l'anxiété générée par ces phénomènes globaux, parfois insaisissables et dont la temporalité, à la fois de court et de long terme, peuvent conduire à un sentiment d'angoisse et d'impuissance (Albrecht, 2003, 2020).

De nombreux termes ont émergé au cours des dernières années, en particulier dans le monde anglo-saxon, pour désigner ces sentiments d'inquiétude et d'anxiété face à un environnement changeant et incertain (« éco-anxiété », « solastalgie », « anxiété climatique », mais aussi « deuil écologique », détresse environnementale » etc.).

Les changements climatiques, qui s'inscrivent dans une dynamique de changements globaux (artificialisation des sols, pollution de l'air, érosion de la biodiversité...) **ont des effets directs** (modifications des données météorologiques, événements extrêmes...) **et des effets indirects via l'environnement** (modifications des écosystèmes, du cycle de l'eau, pollutions...) **et via les déterminants socio-économiques** (infrastructures, production agricole, déplacements de populations, conflits...) **sur la santé des populations**. Les stratégies d'adaptation permettront de s'ajuster à ces effets interdépendants et minimiser leurs conséquences (nombre de décès, pathologies chroniques, blessures, réduction de l'espérance de vie, malnutrition, anxiété...) (Santé Publique France, 2021).

La santé environnementale est définie par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) comme « les aspects de la santé humaine, y compris la qualité de vie, qui sont déterminés par les facteurs physiques, chimiques, biologiques, sociaux, psychosociaux et esthétiques de notre

environnement. Elle concerne également la politique et les pratiques de gestion, de résorption, de contrôle et de prévention des facteurs environnementaux susceptibles d'affecter la santé des générations actuelles et future ».

La santé environnementale doit tenir compte de tous les exposomes auxquels sont confrontés les individus : ces facteurs exogènes liés à l'environnement qui ont des effets sur la santé (qualité des milieux, activités humaines, conditions de vie, expositions professionnelles, comportements individuels, etc.) (Lajarge, 2017).

Face à la prise de conscience généralisée des effets multisectoriels des changements climatiques, la santé environnementale devient une priorité des autorités de santé publique depuis plusieurs années. Initialement, dans les années 1980-1990, les changements climatiques étaient envisagés comme l'unique déterminant environnemental des conséquences sanitaires constatées, par le biais des changements au niveau des « micro-organismes, des agrosystèmes, de l'hydrologie et des changements démographiques ou socio-économiques » (IRD, 2015).

Autour des années 2000, cette vision linéaire s'estompe au profit d'une meilleure intégration de la dimension humaine et de ses capacités « d'anticipation et de résilience » face aux changements globaux. Aujourd'hui, les changements climatiques sont davantage perçus comme une composante des changements environnementaux globaux, au même titre que la dégradation et la perturbation des écosystèmes, les changements d'usage des sols etc., avec, au centre des études, les activités et comportements humains (IRD, 2015). L'analyse des impacts sanitaires des changements climatiques inclue également d'autres facteurs qui entraînent des perturbations à l'échelle globale.

Les liens entre les changements climatiques et leurs effets sur la santé restent complexes, d'autant plus que la santé publique dépend de nombreux facteurs, internes et externes aux individus et aux territoires, et qui impactent directement ou indirectement la santé physique et mentale des individus.

Santé et changements climatiques : et en Occitanie ?

Isabelle ESTEVE-MOUSSION (*ARS Occitanie*)

Le climat a déjà évolué en France avec une augmentation moyenne de près de 1 degré au cours du XX^e siècle. La tendance pour ce siècle est à la poursuite de la hausse des températures moyennes, une augmentation du nombre de jours de canicule en été, une diminution du nombre de jours froids l'hiver et des modifications sur les précipitations tant en quantité qu'en répartition annuelle engendrant davantage de risques de sécheresses, d'incendies et d'inondations. **Le territoire Occitan n'est malheureusement pas épargné par les effets de ce changement climatique et les modifications du climat vont agir le plus souvent comme des facteurs aggravants ou multiplicateurs des risques existants** (voir **chapitre-enjeu Climat régional**).

Des impacts directs

L'augmentation de la température de l'air a un impact direct sur la santé de la population avec une multiplication des hyperthermies et des maladies cardiovasculaires ou respiratoires pouvant entraîner des pics de mortalité. Les personnes les plus vulnérables sont les jeunes enfants, les personnes âgées et les femmes enceintes.

Des impacts indirects

L'intensité et la multiplication des catastrophes naturelles (crues, inondations, incendies, etc.) augmente, et accroît également leurs effets sur les populations sinistrées (décès, dégradations de la qualité des logements, épidémies hydriques, etc.). L'augmentation moyenne des températures avec des pics plus élevés aura également pour effet un usage plus intensif des climatiseurs, dont le fonctionnement favorise l'effet de serre. Cette augmentation a aussi pour effet une augmentation de la température des eaux brutes qui entraîne la prolifération de cyanophycées (bactéries photosynthétiques qui utilisent l'énergie solaire pour synthétiser leurs molécules organiques), dont certaines sont très toxiques (nombreux décès de chiens sur les rives du Tarn lors de bloom massifs), et peuvent entraîner des infections à l'origine de pathologies de l'appareil digestif (gastro-entérite), de la sphère ORL ou des yeux. Les eaux puisées pour l'eau potable peinent à rester sous la barre des 20 °C l'été entraînant une recrudescence des légionelles dans les

réseaux de distribution et entraînant un risque accru de développement de maladies infectieuses comme la légionellose. Cette augmentation a aussi un effet sur la biodiversité notamment sur l'implantation de nouvelles espèces microbiennes, végétales et animales pouvant être à l'origine d'allergies, d'intoxications et de maladies infectieuses (voir **chapitre-enjeu Eau**).

L'ensemble des départements d'Occitanie sont colonisés par *Aedes albopictus* (dit le moustique-tigre). Ce moustique originaire d'Asie du sud a la particularité d'être un vecteur d'arboviroses tropicales. L'Occitanie a enregistré plusieurs foyers de développement autochtones de chikungunya et de dengue dont 3 transmissions en 2020. La tique *Hyalomma marginatum*, l'un des principaux vecteurs du virus de la fièvre hémorragique de Crimée-Congo, est présente depuis 2017. Elle se fixe préférentiellement sur le cheval et a été retrouvée dans les Pyrénées-Orientales, l'Aude, l'Hérault. L'augmentation des températures est un des facteurs de son extension.

Comment atténuer ou s'adapter aux effets du changement climatique sur la santé ?

Au niveau régional et local, des dispositifs d'atténuation et d'adaptation au changement climatique existent au travers du Schéma régional climat air énergie (SRCAE) et les plans climat air énergie territoriaux (PCAET) portés par les intercommunalités de plus de 20 000 habitants. Des initiatives se développent pour encourager les modes de déplacement sains et actifs (les transports sont à l'origine d'1/4 des émissions de gaz à effet de serre), lutter contre les îlots de chaleur et développer la nature en ville (80 % des habitants de la région vivent en zone urbaine, or, les milieux urbains sont plus impactés que les milieux ruraux par l'augmentation de la température de l'air), et ainsi renforcer la lutte contre les inégalités sociales de santé car les populations les plus vulnérables sont aussi celles qui sont les moins bien protégées. En Occitanie, l'ARS et la DREAL ont mis en place un Appel à Projets où un certain nombre d'initiatives concourent à cette adaptation (voir **chapitre-enjeu Mobilité, Milieux urbanisés, Biodiversité**).

Températures en hausse et fragilités sanitaires en Occitanie

Virginie HUGUES (consultante)

Accès aux soins en Occitanie

La région Occitanie présente d'assez fortes disparités quant à l'accès aux soins. Dans les métropoles de Montpellier et de Toulouse, la densité de médecins généralistes (87 médecins en équivalent temps plein pour 100 000 habitants) est supérieure à celle de la région (78) mais également à celle de la France métropolitaine (69). L'espace périurbain est caractérisé par une population avec des revenus plutôt élevés et un large accès aux services de santé. En revanche, dans l'arrière-pays méditerranéen, territoire marqué par des fragilités sociales importantes, dont un taux de pauvreté assez élevé (15 % des personnes de 60 ans ou plus vivent sous le seuil de pauvreté), l'accès aux services y est moins facile même si cette situation s'améliore autour des villes moyennes. C'est dans les territoires ruraux (l'est de l'Aveyron, le Haut-Languedoc, une grande partie de la Lozère, la Haute Ariège, l'Astarac, le Quercy Blanc, la Bouriane et le Figeacois) que l'accès aux services de santé est le plus difficile, car « 1 personne sur 6 réside à plus de vingt minutes d'au moins un des [praticiens suivants, médecin généraliste, pharmacie, kinésithérapeute, chirurgien-dentiste, infirmier], contre 1 sur 100 dans la région » (Fontès-Rousseau, Rodes, 2019). **A l'échelle de la région, nous pouvons retenir que la situation sanitaire demeure plutôt positive malgré des disparités identifiées au niveau local, avec une offre de soins importante et un nombre significatif de médecins généralistes libéraux.**

Exposition des populations vulnérables à la hausse des températures

L'Occitanie est à la croisée de différentes influences climatiques (montagnarde, méditerranéenne et océanique). Cette région présente des espaces très hétérogènes, en termes de reliefs, de densité de population ou encore de dynamisme économique. Sur certains territoires, comme le pourtour méditerranéen et la plaine de la Garonne, les vagues de chaleur devraient être plus fréquentes (voir **chapitre-enjeu Climat régional**). Or, c'est également sur ces territoires que plus de la moitié (55 %) des populations vulnérables réside (personnes âgées, jeunes enfants et populations précaires, **figure 4.1**). Les prévisions montrent également que les journées estivales et les nuits tropicales devraient être plus fréquentes et ce dans tous les territoires de la région (**figure 4.2**), avec pour conséquences une diminution de la résistance des organismes aux journées, mais aussi des phénomènes de déshydratation, une aggravation de certaines maladies chroniques, des coups de chaleur etc. Les impacts de ces vagues de chaleur sont d'autant plus importants là où est concentrée la population, dans les zones urbaines, car celles-ci, par leur constitution, favorisent le phénomène d'îlot de chaleur urbain qui devrait également s'intensifier, alors que « une personne âgée sur six et un jeune enfant sur six résident dans des zones déjà soumises à de fortes chaleurs à répétition » (Perpignan, Narbonne et sud du Gard) (Lardellier, Gautier, Guyon, 2020).

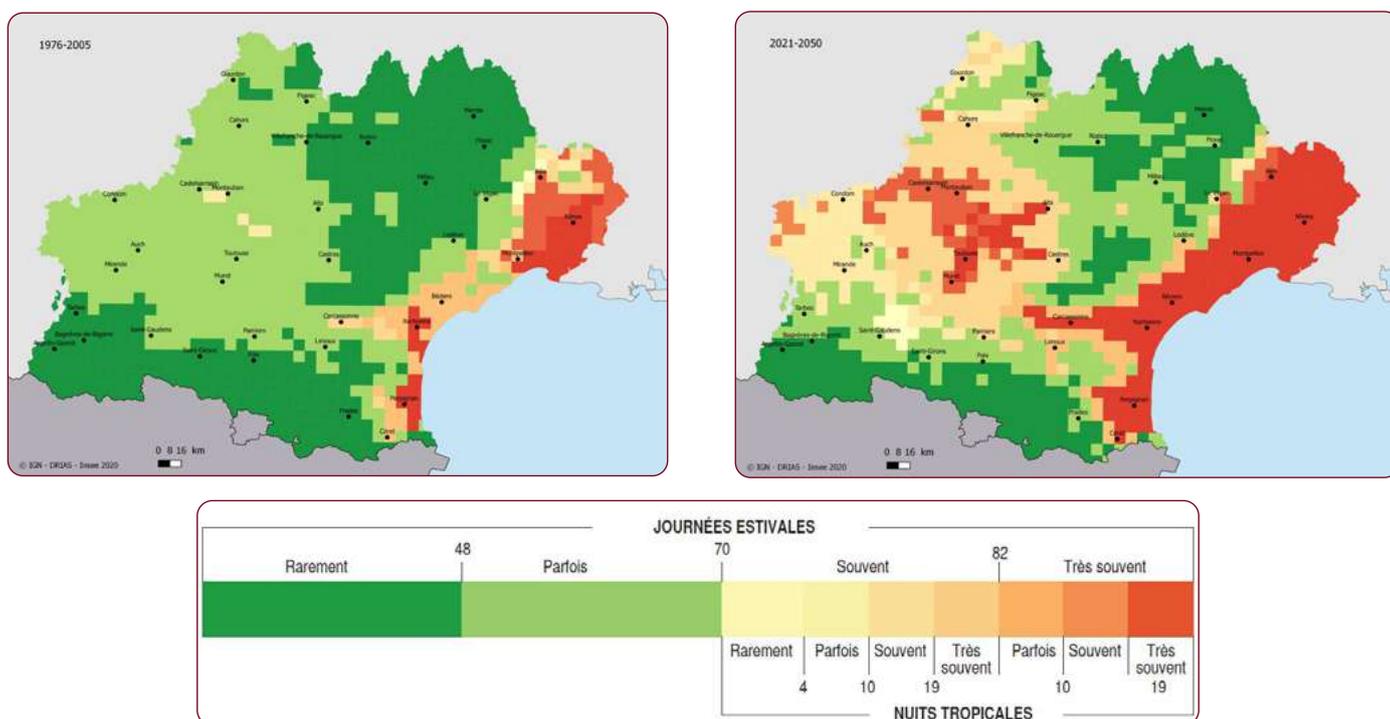


Figure 4.1. Zones de fréquence des fortes chaleurs (journées d'été et nuits tropicales) en Occitanie, pour les périodes 1976-2005 (gauche) et 2021-2050 (droite) selon le scénario RCP8.5, fréquences médianes. (Source : Service climatique DRIAS, Météo-France, simulations Euro-CORDEX dans [INSEE](#), 2020)

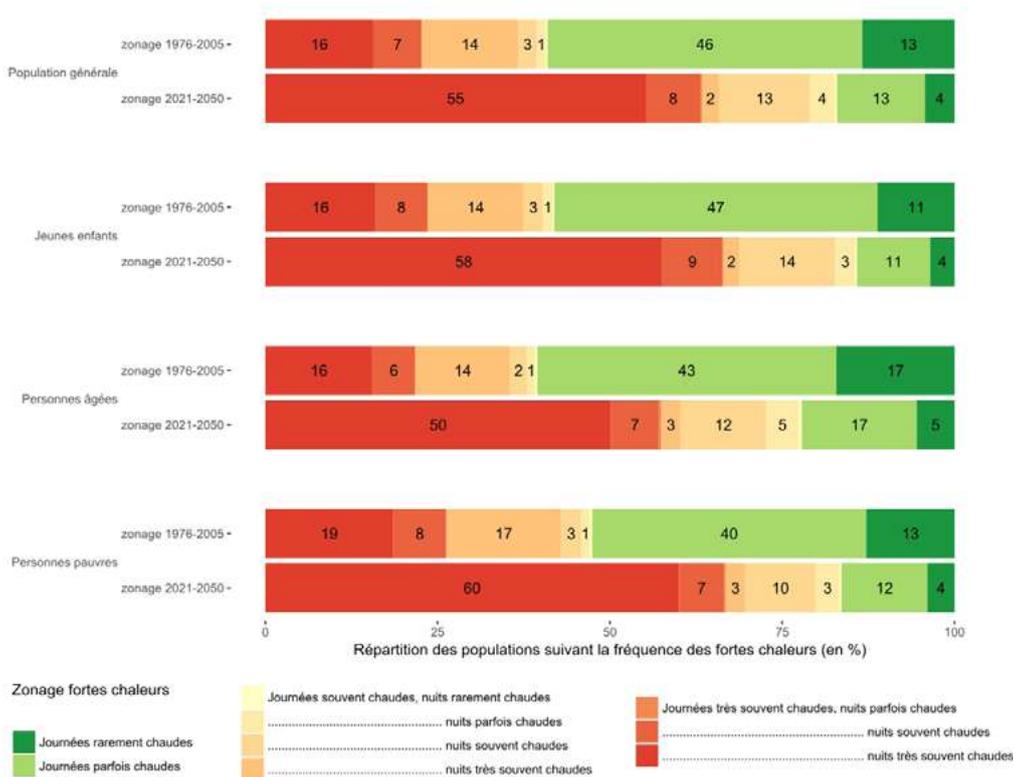


Figure 4.2. Répartition de la population et des sous-populations vulnérables en 2017 suivant la zone climatique du territoire de résidence. Sur la période 1976-2005, 16 % de la population habitait des zones avec des journées estivales et des nuits tropicales très fréquentes. Sur la période 2021-2050, cette part pourrait atteindre 55 % de la population.
 (Source : Insee, Fichier démographique sur les logements et les individus 2017 (Fidéli) dans [INSEE, 2020](#))

EHPAD et risque d'inondation : du constat à l'action pour accompagner les établissements face au changement climatique

Ghislaine VERRHIEST-LEBLANC (MIIAM / DREAL ZDS sud), Alaa RAMDANI (ARS zonale), Laurent POUMARAT (ARS zonale), Agathe ANDRE-DOUCET (ARS Occitanie), Jean-Pierre ALESSANDRI (ARS Corse), Nicolas CATALA (CYPRES), Eric POURTAIN (CYPRES), Michel SACHER (CYPRES), Michel BACOU (Cerema).

Le retour d'expérience des inondations majeures a montré que parmi les enjeux particulièrement exposés et aux inondations sur l'arc méditerranéen, les Établissements d'Hébergement pour Personnes Âgées Dépendantes (EHPAD) tiennent une place à part, du fait de la vulnérabilité de leurs résidents.

Par ailleurs, les effets du changement climatique font craindre une augmentation du nombre d'évènements extrêmes tant en termes de précipitation que d'inondations rapides associées. **L'observation sur les 50 dernières années montre que sur le pourtour méditerranéen, les pluies extrêmes quotidiennes** (quantité de pluie par mètre carré et par jour) **sont de plus en plus intenses.** Une augmentation de 22 % +/- 5 % a été mise en évidence sur la période 1961-2015 pour le cumul maximum annuel observés par les stations pluviométriques (Ribes et al, 2018).

Depuis l'année 2000, le nombre d'évènements générant des cumuls de pluie supérieurs à 200 mm est également en hausse significative du point de vue statistique. Sur le pourtour méditerranéen, les modèles de climat actuels envisagent, à l'horizon 2050, une intensification des cumuls quotidiens extrêmes, bien que relativement faible et incertaine. Ces éléments font craindre une augmentation des risques d'inondation (figure 4.3). Si quelques actions de prévention et de réduction de vulnérabilité ont déjà été engagées sur les EHPAD, un état des lieux global a été rendu nécessaire pour construire une stratégie d'actions et d'accompagnement de ces établissements face aux risques.

C'est pourquoi, la Mission interrégionale « inondation arc méditerranéen » (MIIAM) de la DREAL de zone de défense et de sécurité Sud, en collaboration avec les quatre Agences Régionales de Santé (ARS) de sa zone

d'action, et en s'appuyant sur le CEREMA et le CYPRES, a souhaité :

- caractériser l'exposition aux risques d'inondation des EHPAD de l'arc méditerranéen ;
- identifier des bonnes pratiques dans ces établissements en matière de réduction de la vulnérabilité ;
- conduire une démarche test de diagnostic de vulnérabilité sur quelques établissements ;
- formuler des recommandations à destination des gestionnaires et des services de l'État.

Sur les 1 586 établissements que compte l'arc méditerranéen, près de la moitié est exposée aux inondations, la plupart d'entre eux accueillant plus de 50 résidents (figure 4.4). Le nombre d'établissements exposés varie en fonction de la donnée inondation utilisée : 692 dans l'Enveloppe approchée des inondations potentielles (EAIP – zone la plus large), 512 dans l'Atlas des Zones Inondables (AZI) et 321 dans les Plans de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI – zone où la construction est réglementée).

Selon les départements, le pourcentage de structures exposées est variable. Arrivent en tête sur ce point les départements de Vaucluse (75 %), d'Ariège (69 %), des Pyrénées-Orientales, de la Drôme (67 %) et de l'Aude (66 %). À l'inverse, le Gers (10), la Lozère (4) et les deux départements de Corse (3) sont ceux où le nombre de

structure est le moins élevé, c'est aussi les moins peuplés. Afin de disposer d'éléments quant à la conscience et à la prise en compte du risque d'inondation au sein des EHPAD, mais également dans le but d'identifier les bonnes pratiques en matière de gestion de ce risque, une enquête a été réalisée. Les ARS et leurs représentations départementales ont diffusé un questionnaire web, en mars et avril 2021, auprès des directeurs d'établissement. Sur les 690 établissements contactés, 33 % ont répondu à l'enquête. Les résultats montrent la nécessité de travailler à la sensibilisation et à l'accompagnement des gestionnaires des EHPAD pour contribuer à l'amélioration de la connaissance et de la prévention des risques d'inondation, mais aussi de la préparation à la gestion de crise (seulement 2 % ont participé à des exercices « inondation »).

La caractérisation de la vulnérabilité des EHPAD aux inondations suscite l'intérêt des gestionnaires qui sollicitent un accompagnement en la matière. Certains se sont déjà engagés dans des démarches de gestion des risques et sont prêts à les partager au sein des communautés professionnelles. Les résultats de ce questionnaire confirment la pertinence de la démarche et des livrables publiés par la MIIAM et ses partenaires, et ceux à venir, dans le cadre de l'étude sur l'exposition des EHPAD aux risques d'inondation sur l'arc méditerranéen, conduite en 2021 (portrait de territoire, outil cartographique et cahier d'auto-évaluation).

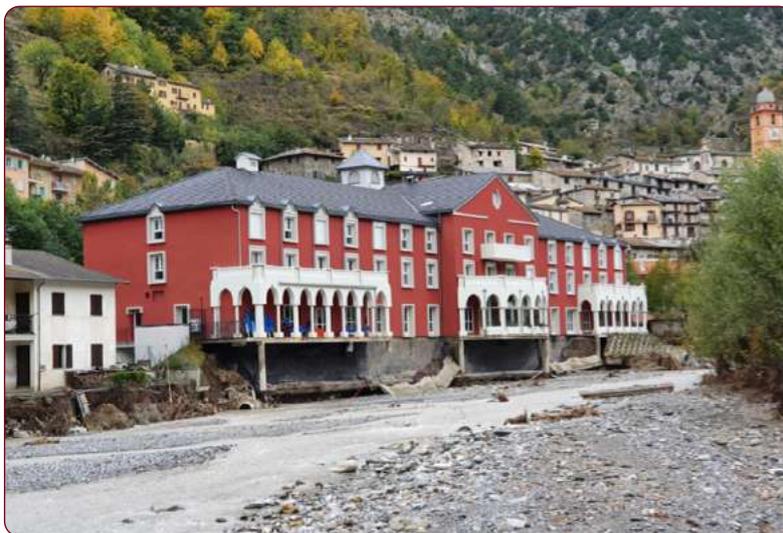


Figure 4.3. EHPAD de Tende impacté par les inondations survenues en octobre 2020.
(Source : AFPS)

Région	Nombre total de structures	Dans l'EAIP		Dans l'AZI		Dans les PPRI	
		Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%
ARC MED	1593	692	43	512	32	321	20
Corse	23	7	30	6	26	5	22
PACA	599	236	39	216	36	93	15
AURA (2 départements)	136	80	59	21	15	19	14
Occitanie	828	369	44	269	32	204	25

Figure 4.4. Nombre de structures d'accueil de personnes âgées en zone inondable (EAIP, AZI ET PPRI) par région.
(Source : MIIAM, 2021)

Qualité de l'eau - « Bioinspir' » : Traitement bio-inspiré des eaux industrielles en zones exposées aux aléas climatiques

Claude GRISON (CNRS - ChimEco)

Ressource naturelle vitale, l'eau est également un élément moteur du développement économique et social. Les activités domestiques, agricoles et industrielles, ajoutées aux facteurs tels que changements climatiques, pression démographique, surconsommation de l'eau, constituent une véritable menace pour l'accès aux ressources en eau potable. Selon le Partenariat Français pour l'Eau, « l'eau est la première ressource concernée par le dérèglement climatique avec tous les indicateurs au rouge » (voir [chapitre-enjeu Eau](#)).

Face à la pollution générée, les traitements mis en place pour répondre à la réglementation accentuent le problème, puisqu'ils génèrent des boues toxiques très difficiles à gérer et exposées aux inondations. Développer de nouvelles approches pour anticiper ces situations, prévenir les sources de pollution, traiter les eaux polluées en amont, en mettant en place des procédés de traitement innovants faisant appel à des technologies durables sont devenus une nécessité.

Tel est l'objet des travaux de recherche de ChimEco, qui développe des colonnes de filtration remplies de poudres végétales pour retenir les éléments métalliques polluants (des métaux stratégiques tels que palladium ou terres rares, des métaux primaires en voie de raréfaction comme le zinc, ou des métaux très toxiques comme l'arsenic, le plomb, le cadmium). Ce filtre végétal est également efficace vis-à-vis des polluants émergents (perturbateurs endocriniens, néonicotinoïdes, pesticides). Il s'agit d'une solution écologique et innovante permettant d'éviter tout échappement de métaux dans les systèmes aquatiques et la formation de boues industrielles contaminées.

Le filtre végétal est éprouvé à grande échelle (construction de deux pilotes) qui fonctionnent in natura. Développé sur le grand site minier des Malines (Gard) et dans la vallée de l'Orbiel (Aude), le filtre végétal est constitué du système racinaire de plantes aquatiques, qui peuvent être classées en deux catégories :

- les plantes aquatiques européennes menacées par le réchauffement climatique (liste rouge UICN). Le chef de file est la menthe aquatique que nous développons dans le Gard en hydroponie à des fins de conservation et de dépollution ;
- les plantes aquatiques introduites maladroitement sur le territoire européen ; certaines d'entre elles sont devenues invasives en Europe, allant jusqu'à étouffer la vie aquatique.

Compte-tenu des conditions climatiques locales, ce problème est très avancé en région Occitanie. Leur éra-

dication est très difficile et décourageante, voire inappropriée et constitue un problème récurrent pour les gestionnaires de bassin. Déshydratées et broyées finement, ces plantes sont très efficaces dans le filtre végétal dépolluant. Deux d'entre elles sont réglementées mais non problématiques en Europe pour leur potentiel d'invasion (pas de production de graines, plantes gélives...). Dans chaque cas, les poudres végétales gorgées de métaux après dépollution sont valorisées par un programme innovant de recyclage écologique par un procédé de chimie durable : l'écocatalyse (Grison, Lock Toy Ki, 2021). Il n'y a donc aucun déchet.

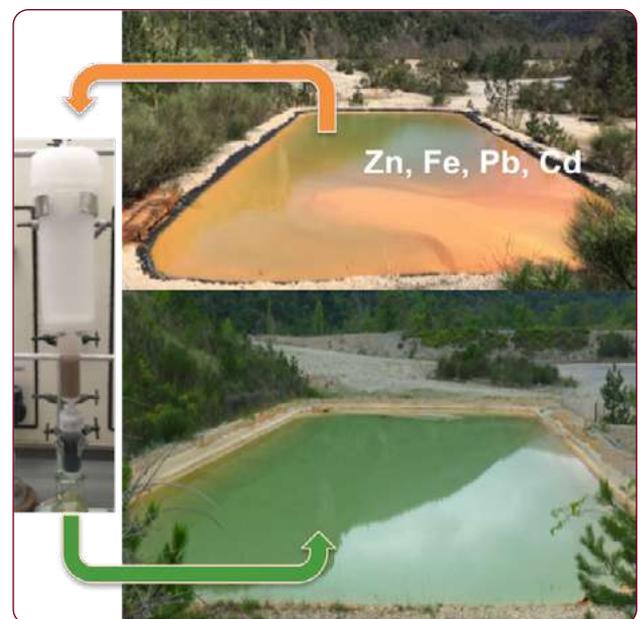


Figure 4.5. Dépollution des eaux minières (Malines/Gard) par le filtre végétal ChimEco/Bioinspir. (Source : C. Grison)

La start-up Bioinspir a été créée à Montpellier pour développer ces résultats à l'échelle industrielle. Son objectif est double : soutenir les efforts d'éradication des espèces exotiques envahissantes dans le respect des règles d'usage, et dépolluer les effluents industriels hautement contaminés à l'aide de cette technologie écologique qui peut conduire à la fin des boues industrielles problématiques et exposées aux aléas climatiques.

Ce programme est une double opportunité environnementale puisqu'il **permet une gestion durable et contrôlée des plantes aquatiques exotiques envahissantes mais aussi la restauration de la qualité des systèmes aquatiques**. Il offre également une opportunité économique. Il est aujourd'hui le point de départ d'une chimie écologique capable de créer des molécules 100 % biosourcées ([figure 4.5](#)).

Changements climatiques, qualité de l'air et santé

Virginie HUGUES (consultante), Béatrice JOSSE (Météo-France et CNRS - CNRM)

En 2018, 27 procédures départementales d'informations pour épisode de pollution et 10 procédures d'alerte (avec mise en place de mesures d'urgence visant à limiter les activités sources de pollution de l'air) ont été déclenchées en Occitanie (ATMO Occitanie, 2019). Le lien entre changements climatiques, santé et qualité de l'air est avéré mais demeure assez récent.

L'étude des modifications de la composition chimique de l'air dues aux changements climatiques et de leurs conséquences en termes de santé commence à apparaître et a été largement analysée à l'échelle globale ou continentale (outil de visualisation de données relatives à la santé de la plateforme VizHub, le projet européen IMPACT2C, etc.), mais nous ne disposons pas à ce jour de données précises à l'échelle de l'Occitanie.

L'air est composé de gaz et de particules, pour certains d'origine anthropique (transports, produits phytosanitaires) et pour d'autres naturelle (éruptions volcaniques, pollens) qui, lorsque leur concentration augmente, vont altérer la santé des individus et endommager les voies respiratoires, le système circulatoire et neurologique, augmenter le risque de maladies liées à la pollution de l'air (cancers, maladies ischémiques, maladies cardiaques et pulmonaires chroniques etc.). Il apparaît que l'exposition chronique à la pollution détériore davantage la santé que les pics de pollution (URPS Occitanie).

Etude de la composition chimique de l'air : climat et émissions

L'étude de la qualité de l'air doit prendre en compte l'analyse du climat et des changements climatiques mais aussi les trajectoires des émissions de substances polluantes. Des synergies existent entre ces deux phénomènes.

Par exemple, les changements climatiques vont potentiellement créer des conditions favorables à une formation d'ozone plus fréquente, à une augmentation des concentrations de particules fines associées à des incendies, ou à des brumes de sable du Sahara (Santé Publique France, 2019), qui ont notamment atteint la région Occitanie à plusieurs reprises en 2021.

Un épisode de pollution aux particules en suspension PM10 (particules dont le diamètre est inférieur à 10 micromètres et peuvent pénétrer les bronches) a eu lieu pendant plusieurs jours en mars 2021 dans les départements des Hautes-Pyrénées, de l'Ariège, des Pyrénées-Orientales et de la Haute-Garonne.

Certains gaz composant l'air ont un Potentiel de Réchauffement Global (PRG) important : avec comme base 1 pour le CO₂, le méthane a un PRG à 100 ans de 30 (GIEC, AR5, 2013) ; d'autres composantes de l'air, comme certaines particules, grâce à un albédo élevé, auront un effet, à l'inverse, refroidissant. En revanche, si elles ne contribuent pas directement à un réchauffement du climat, ces particules sont néfastes pour la santé et sont responsables d'un grand nombre de maladie et de décès.

Les particules et gaz présents dans l'air n'ont pas les mêmes effets en termes de santé ou de climat : **certaines espèces impacteront uniquement la santé, d'autres, uniquement le climat, d'autres encore seront néfastes pour la santé et contribueront également à modifier le climat.** Toutefois, l'effet de la modification de la composition chimique de l'air sur le climat aura également des effets indirects sur la santé humaine (canicules et altération de la qualité de vie, augmentation de certaines maladies etc.), mais aussi sur la santé des écosystèmes.

La pollution à l'ozone et aux particules fines, fortement néfaste pour la santé humaine

La pollution à l'ozone est responsable de nombreux décès et un climat plus chaud pourrait être favorable à la formation et la concentration de l'ozone, et ainsi accroître ses effets sur la santé (Corso et al., 2015). Néanmoins, la hausse des températures pourra également entraîner une augmentation de la hauteur de la couche limite de l'atmosphère, la quantité de polluants serait donc moins concentrée : le phénomène prédominant n'est pas toujours identifiable.

L'utilisation de différents modèles (CHIMERE, EMEP, MATCH, MOCAGE) dans le cadre du projet européen IMPACT2C (2011-2015), a permis d'identifier qu'une augmentation du climat de +2 °C modifierait la composition de l'atmosphère en termes de concentration d'ozone et de particules notamment, en partie due à des changements de température, des précipitations, de la circulation atmosphérique ou encore à des turbulences dans la couche limite de l'atmosphère.

La qualité de l'air est un enjeu majeur de santé publique et fait l'objet d'observations quotidiennes pour prévenir les pics de pollution et les risques sanitaires qu'ils induisent en vue d'adapter nos comportements (mobilité, pratique sportive, etc.). Les changements climatiques, et en particulier les vagues de chaleur, peuvent modifier la composition de l'air et altérer la santé des individus dans les territoires concernés. Ce constat renforce la nécessité d'adapter nos comportements lors des épisodes de forte pollution.

Qualité de l'air – ESPAIR : Santé des enfants, contexte social, pratiques parentales, qualité de l'air extérieur

Chantal ZAOUCHÉ GAUDRON (UT2J - LISST), Jean-Luc ATTIE (UPS - LA)

À l'intérieur et à l'extérieur de nos lieux de vie, la qualité de l'air est un enjeu sanitaire majeur. L'intensité des épisodes de pollution aux particules survenus en France, notamment depuis 2014, a conduit à une médiatisation importante de la qualité de l'air et à des moyens plus importants pour limiter les épisodes de pollution. L'approche écosystémique propose de s'appuyer sur une perspective multidimensionnelle (Bronfenbrenner, 1986) et multifactorielle (facteurs humains et environnementaux) que l'on retrouve dans les « échelles d'observation du réel par les sciences humaines et sociales » (Martin et Gaspard, 2016). L'objectif du projet ESPAIR, d'envergure nationale, est d'analyser :

- d'une part, les modes de fonctionnement et la mobilité des populations qui dépendent des conditions socio-psychologiques (catégories socio-professionnelles, niveau d'études, âge, sexe, lieux d'habitation, conditions de travail et perception du risque quant à la qualité de l'air) qui pilotent leur mode de vie ;
- d'autre part, la santé des jeunes enfants en lien avec les représentations et les pratiques parentales liées à la qualité de l'air extérieur (pratiques d'aération, de confinement, de protection, d'usage

de la voiture, loisirs...), en prenant en compte les positions sociales (statuts familiaux, ressources et contraintes) et le cadre de vie des usagers (pôle urbain versus couronne péri-urbaine versus pôle rural).

Une approche statistique quantitative est envisagée à travers un questionnaire en ligne (adapté de Ségala, 2010), qui a été renforcé par des questions sur la santé des jeunes enfants en lien potentiel avec la qualité de l'air de leur environnement. Les données de qualité de l'air issues de la plateforme de prévision de la qualité de l'air en France (PREV'AIR) seront étudiées sur les zones géographiques des répondants.

L'analyse permettra aussi de donner des clés aux décideurs pour réduire, de façon plus efficace, la dégradation de la qualité de l'air de demain. Cette [enquête](#) réalisée par le Groupement d'Intérêt Scientifique « Bébé, petite Enfance en Contextes » BECO-UFTMiP, **permettra aux chercheurs spécialisés dans les disciplines de la physico-chimie de l'atmosphère, de la sociologie, de la psychologie et de la santé d'apporter un éclairage sur nos habitudes dans notre environnement** (voir [chapitre-enjeu Psychosocial](#)).

Changement climatique et maladies à transmission vectorielle

Gérard DUVALLET (UPV - CEFE)

Les habitants d'Occitanie et du sud de la France métropolitaine ont bien ressenti depuis 2004 l'arrivée puis l'extension du moustique-tigre (*Aedes albopictus*). Originaire d'Asie du Sud-Est, cette espèce a bénéficié de la mondialisation et de la rapidité des échanges commerciaux pour envahir le monde. Ce moustique-tigre est une nuisance en raison de sa piquûre. Il s'agit d'une espèce hématophage : les femelles se nourrissent de sang pour le développement de leurs œufs. Cette espèce est également un vecteur potentiel de pathogènes. Les pathologies qui en découlent sont parfois nommées maladies émergentes, car elles n'étaient pas connues auparavant dans nos régions.

Les virus transmis par des arthropodes (insectes ou acariens) sont connus sous le nom d'arbovirus (arthropod borne virus en anglais). Il s'agit principalement des virus de la dengue, du chikungunya ou du Zika. **En Occitanie, plusieurs cas de transmission locale de virus importés de régions tropicales ont été rapportés** (par des voyageurs en provenance de ces régions). Quelques années auparavant d'autres moustiques locaux, du genre *Culex*, avaient transmis autour de la Camargue le virus

West Nile, importé d'Afrique équatoriale par des oiseaux migrateurs. Ces pathogènes, passant des animaux à l'homme et réciproquement, sont à l'origine de maladies connues sous le terme de zoonoses.

Les arthropodes hématophages peuvent constituer ce que les entomologistes médicaux appellent des vecteurs, capables de s'infecter avec un pathogène (virus, bactérie, protozoaire ou helminthe) lors d'un repas de sang pris sur un vertébré et de le transmettre à un autre vertébré sensible lors d'un repas suivant. La maladie est ensuite la réaction du vertébré au pathogène transmis. Les vecteurs transmettent donc des pathogènes, et non des maladies comme on l'entend souvent. En dehors des moustiques (Diptères, Culicidés), les vecteurs principaux que l'on peut rencontrer en Occitanie sont les phlébotomes (Diptères, Psychodidés), les culicoïdes, petits moucheron piqueurs connus ici sous le nom d'arabis (Diptères, Cératopogonidés), mais aussi les tiques (Acariens, Ixodidés). De nombreuses autres familles d'insectes sont hématophages et peuvent ainsi, outre la nuisance, assurer la transmission aux humains et aux animaux de pathogènes : les taons (Diptères,

Tabanidés), les puces (Siphonaptères), les poux (Phthiraptères), les stomoxes (Diptères, Muscidés) (**figure 4.6**), les simulies (Diptères, Simulidés) ([Duvallet, Fontenille et Robert, 2017](#)).

Parmi les maladies à transmission vectorielle émergentes ou ré-émergentes en Occitanie, on peut citer :

- les arboviroses déjà signalées (dengue, chikungunya, Zika) dont l'extension vers le nord est le résultat de l'extension de l'aire de distribution du vecteur, le moustique-tigre ;
- une autre arbovirose qui intéresse la santé animale : la fièvre catarrhale ovine, ou maladie de la langue bleue, qui affecte ovins et bovins. Les différents sérotypes du virus importés en Europe ont été transmis par des moucheron de la famille des Cératopogonidés (les Culicoïdes). La maladie a eu un impact considérable sur la filière élevage dans notre région ;
- une tique (*Hyalomma marginatum*), originaire des régions subtropicales, est arrivée récemment en Occitanie, autour de Montpellier, sans doute transportée par des oiseaux migrateurs (**figure 4.7**).

Profitant du réchauffement climatique, elle s'est rapidement adaptée à nos écosystèmes méditerranéens. Cette tique est connue comme vecteur d'une maladie potentiellement mortelle, la fièvre hémorragique de Cri-

mée-Congo. Or plusieurs cas de cette pathologie ont déjà été recensés en Espagne. Les entomologistes et les services de santé publique surveillent de près cette espèce invasive.

Dans ces exemples, on voit l'importance des actions anthropiques dans l'émergence de ces pathologies : transport des vecteurs, des pathogènes ou des hôtes d'un continent à l'autre. Le réchauffement climatique facilite le maintien, la survie et la dispersion des espèces introduites. Les hivers plus doux et plus courts en Occitanie augmentent la durée de la période favorable aux arthropodes pour compléter leurs cycles de vie. On a pensé longtemps que les maladies à transmission vectorielle étaient présentes principalement en régions tropicales, force est de constater qu'elles sont désormais présentes aussi dans nos régions tempérées.

Il est nécessaire de **soutenir la formation et la recherche en entomologie médicale et vétérinaire pour identifier rapidement ces vecteurs invasifs, comprendre leur écologie et trouver les méthodes de contrôle** les moins impactantes pour l'environnement. Tout le travail de terrain devrait se faire en parfaite multidisciplinarité associant entomologistes, écologistes, épidémiologistes, vétérinaires et médecins biologistes. La situation actuelle liée à la Covid-19 nous montre que la prévention est un impératif pour éviter des situations de crises.



Figure 4.6. *Stomoxys calcitrans* mâle (stomoxe).
(Source : Duvallet)



Figure 4.7. *Hyalomma Marginatum*.
(Source : Duvallet)

S'adapter aux impacts des changements climatiques sur la santé avec la biodiversité

S'adapter aux changements climatiques et à leurs impacts en termes de santé est possible notamment grâce à la mise en œuvre de Solutions d'adaptation fondées sur la Nature (SafN), qui sont « des actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer les écosystèmes naturels ou modifiés, pour relever directement le défi de l'adaptation au changement climatique, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité » (UICN). Ces solutions peuvent être le développement de la végétalisation en ville et des infrastructures vertes, la désimperméabilisation des sols, la restauration de zones humides etc. Celles-ci peuvent présenter des effets positifs en termes de santé physique, sur les maladies chroniques notamment, qui représentent environ 70 % de la mortalité mondiale et sont favorisées par la pollution (OMS, 2017). Un espace de nature contribue à réduire la pollution atmosphérique, peut agir positivement sur les maladies respiratoires (Crouse et al. 2017) et favorise également la pratique sportive.

En termes de santé mentale et de bien-être psychologique également des études ont montré des bénéfices et des améliorations de la qualité de vie des individus : réduction du stress, de l'anxiété, de la tension artérielle (Tsunetsugu et al. 2013), du rythme cardiaque (Sonntag-Öström et al. 2014), voire même de la dépression et la diminution des « traitements à visée anxiolytique » (Nutsford et al. 2013). La renaturation des milieux urbanisés apparaît aujourd'hui comme un levier majeur en termes de santé publique (Rojas-Rueda et al. 2019) et même si de nombreux sujets sont encore aujourd'hui à l'état d'hypothèses et doivent être précisés, les recherches convergent vers un consensus en faveur de la biodiversité pour améliorer la santé des individus.

Anticiper la dynamique d'insectes vecteurs dans un contexte de changements environnementaux et climatiques

Annelise TRAN (CIRAD - TETIS), Marie DEMARCHI (Maison de la Télédétection), Mathieu CASTETS (CIRAD - TETIS), Renaud MARTI (IRD - CBGP), Thierry BALDET (CIRAD - ASTRE)

Les maladies vectorielles, pour lesquelles l'agent pathogène (virus, bactérie, parasite) est transmis par la piqûre d'un insecte vecteur (moustiques, phlébotomes...), ont un impact important sur la santé humaine et animale dans le monde. Leur transmission est susceptible d'être modulée par les variations du climat, qui peuvent influencer sur les cycles de développement du pathogène et du vecteur, dont elles conditionnent la présence et l'abondance. Des températures plus élevées sont globalement favorables aux insectes vecteurs et à la transmission des agents pathogènes associés (Kraemer et al. 2019).

Dans le Sud de la France, par le passé, le paludisme - transmis à l'Homme par certains moustiques Anopheles - constituait un problème sanitaire majeur, notamment en Camargue, foyer actif jusqu'au début du XX^e siècle. L'assèchement des marais, l'amélioration des logements et des conditions de vie, et l'utilisation de la quinine ont permis l'élimination du paludisme dans cette région, et plus largement en France métropolitaine. Aujourd'hui, même si des moustiques du genre Anopheles sont présents, le risque de ré-émergence de cette maladie est faible (Ponçon et al. 2008).

En revanche, le moustique tigre *Aedes albopictus*, originaire d'Asie, adapté à l'habitat urbain et récemment implanté en Europe à la faveur de l'intensification des échanges commerciaux internationaux, constitue aujourd'hui un important enjeu de santé publique en France, comme vecteur des virus de la dengue, du Chikungunya et du Zika. Détecté en 2004 dans les Alpes-Maritimes, son adaptation au climat et conditions environnementales locales a permis sa rapide expansion à tout le territoire. Il est installé dans 64 des 96 départements de l'Hexagone (Ministère des Solidarités et de la Santé, 2021, Cartes de présence du moustique tigre (*Aedes albopictus*) en France métropolitaine).

Le retour de voyageurs infectés des régions tropicales où le virus est fréquemment présent augmente le risque d'épidémie aux périodes été-automne lorsque *Ae. albopictus* est abondant en France métropolitaine. Ainsi ont été détectés à Nice, Nîmes, Lyon, Montpellier des cas de dengue et chikungunya autochtones (personnes ayant contracté la maladie sans avoir voyagé en zone

infectée). En l'absence de vaccin et traitement efficaces, la prévention des épidémies causées par le moustique tigre repose aujourd'hui sur la surveillance et le contrôle des populations de vecteurs.

Ainsi, pour mieux cibler ces actions, un outil de modélisation baptisé ARBOCARTO a récemment été développé pour créer des cartes prédictives de l'abondance des moustiques *Aedes* (Tran et al. 2020a). L'outil prend en compte l'impact des températures et pluies journalières sur le développement du moustique, ainsi que le contexte environnemental local, comme la disponibilité en gîtes larvaires (contenants d'eau dans lesquels les femelles *Aedes* pondent leurs œufs et où leurs larves se développent).

Les sorties de l'outil sont des cartes dynamiques qui permettent d'identifier, à l'échelle des quartiers d'une ville, les zones et périodes à risque de prolifération des moustiques. ARBOCARTO permet de modéliser aussi l'impact des scénarii de lutte antivectorielle. Avec une interface utilisateur simple, ARBOCARTO est aujourd'hui utilisé de manière opérationnelle par les gestionnaires de santé publique à l'Île de la Réunion (Tran et al. 2020b) et en Occitanie (figure 4.8).

Ainsi, la distribution des insectes vecteurs comme le moustique tigre, parce qu'ils dépendent étroitement des conditions climatiques et environnementales, est susceptible d'être considérablement modifiée par les changements globaux actuels. La compréhension par des approches expérimentales ou observationnelles de l'impact du climat sur la dynamique des populations de vecteurs permet, par la modélisation, de prédire efficacement cette dynamique, de développer des outils adaptés à la surveillance et au contrôle des maladies vectorielles ainsi que d'explorer la dynamique future de ces maladies selon différents scénarios de changements climatiques.

Cette démarche requiert une collaboration intersectorielle et interdisciplinaire entre entomologistes, épidémiologistes, écologues, modélisateurs, géomaticiens, informaticiens et acteurs de santé publique.

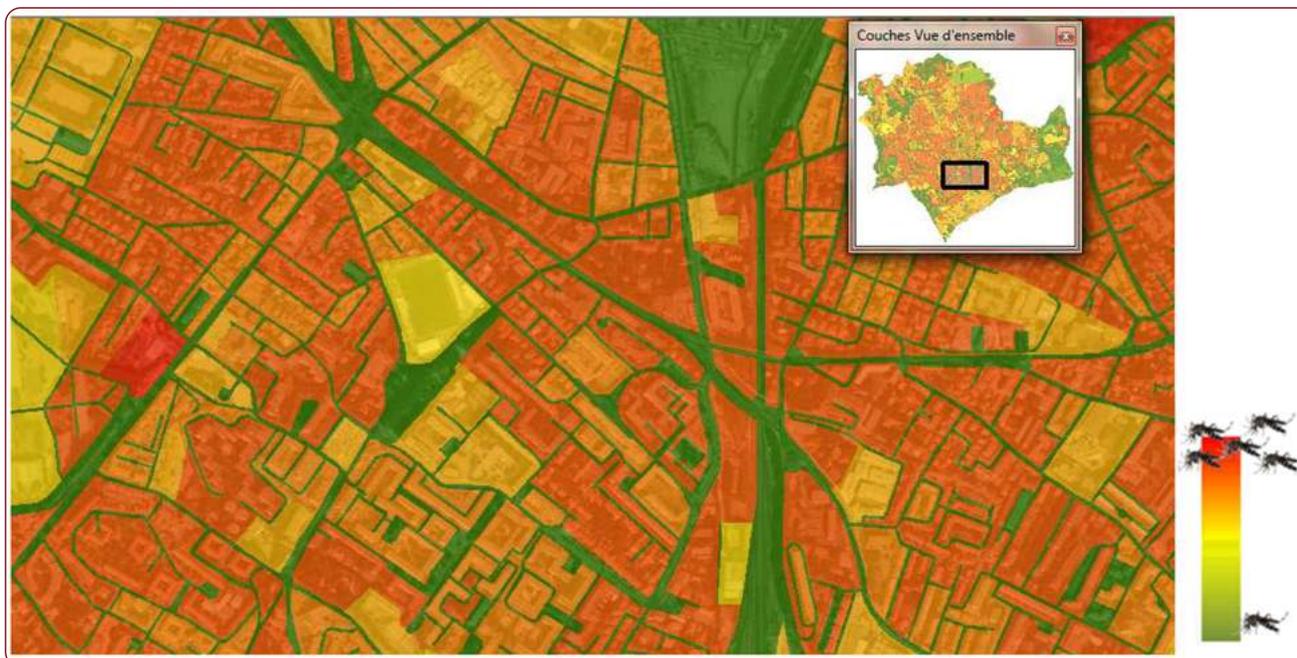


Figure 4.8. Exemple de cartographie de la densité de moustiques-tigre adultes prédite par l'outil ARBOCARTO à l'échelle infra-urbaine, Montpellier, août 2018. Les couleurs présentent un gradient de densité du vert (faible densité) au rouge (forte densité).
(Source : M. Demarchi)

Changements climatiques et pratiques sportives

La pratique de l'activité physique pourrait être limitée à cause des pics de chaleur et des fortes concentrations de particules dans l'atmosphère, selon une revue de littérature qui a rassemblé soixante-quatorze publications (Bernard et al, 2021). Une étude publiée en juillet 2021 par WWF France confirme ces résultats et estime qu'à l'échelle nationale, les français pourraient perdre 24 jours de pratique par an dans un scénario à +2 °C et jusqu'à « 2 mois d'activité sportive par an dans un monde à +4 °C ». Des études plus précises sur les impacts des changements climatiques sur la pratique sportive en Occitanie seraient nécessaires pour mieux comprendre et identifier plus précisément les effets des modifications du climat sur la pratique, les équipements et sites sportifs (clubs de voile et autres sites littoraux, stations de ski, salles de sport, stades engazonnés...), mais aussi la santé des sportifs (coups de chaleur, déshydratation, crampes, augmentation de la pollution et impacts sur le système cardiovasculaire...), partant du constat que la pratique sportive est déconseillée au-delà de 32 °C (WWF France, 2021).

A l'échelle de la région Occitanie, la santé est la première motivation à pratiquer une activité physique pour près d'un habitant sur deux (INJEP, 2020). La course et/ou la marche à pied sont largement pratiquées par la population (deux occitans sur cinq, INJEP, 2020). Pourtant, les conditions climatiques favorables à cette activité pourraient se détériorer et limiter largement cette pratique (figure 4.9) : le nombre de jours dépassant 32 °C pourrait augmenter de 25 à 35 jours dans 4 départements (Hautes-Pyrénées, Ariège, Pyrénées Orientales et Lozère), de 35 à 45 jours dans 5 départements (Gers, Haute-Garonne, Aude, Tarn et Aveyron) et de 45 à 55 jours dans 4 départements (Tarn et Garonne, Lot, Hérault et Gard).

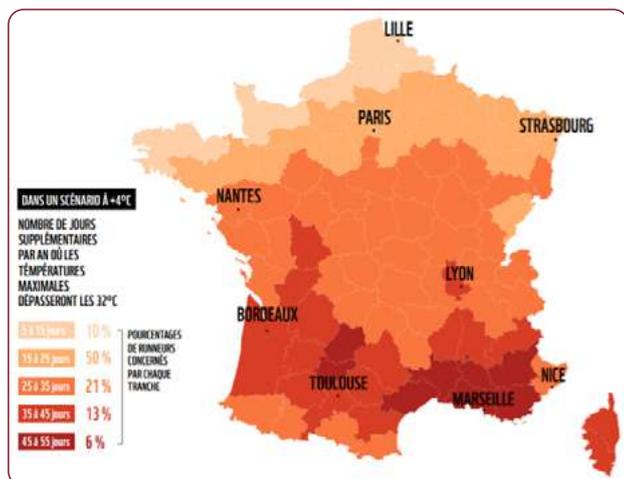


Figure 4.9. Exposition des runners au nombre de jours supplémentaires en vague de chaleur.
(Source : WWF France, 2021)

Changement climatique, alimentation et modes de vie : quelles menaces pour notre santé ? Quels comportements pour atténuer les effets du climat ?

Marie Josèphe AMIOT-CARLIN (INRAE - MoISA)

Les changements climatiques contribuent déjà à l'augmentation des maladies et des morts prématurées. Deux études récentes de haut niveau (Willett et al. 2019, Swinburn et al. 2019) ont mis en évidence les effets négatifs des régimes alimentaires actuels sur la santé humaine et planétaire. L'obésité et le changement climatique formeraient une syndémie globale qui entrelace les facteurs de santé, biologiques et environnementaux aggravant, par leur synergie, les problèmes de santé (Swinburn et al. 2019). **En Occitanie, l'obésité qui expose à de lourdes conséquences sur la santé touche 15,5 % de la population en 2020** (Ligue contre l'obésité, 2021).

Les systèmes alimentaires sont non seulement responsables des maladies mais génèrent aussi 25 % à 30 % des émissions de gaz à effet de serre. Le rapport EAT-Lancet (Willett et al. 2019) préconise un « régime de santé planétaire » par une végétalisation de l'assiette composée pour 75 % de fruits, légumes, céréales et légumineuses. Dans notre étude Montpelliéraine, intitulée Medina (financée par l'Agence Nationale de la Recherche) en collaboration avec Solagro, l'assiette optimisée pour atteindre les recommandations nutritionnelles dans le Sud de la France serait composée de moins de viande (surtout de viande rouge), d'œuf, de lait et de pomme de terre et plus de poissons, de céréales, et de fruits et de légumes, ce qui permettrait de diminuer globalement les émissions de gaz à effet de serre de 35 %.

Si la viande rouge est pointée du doigt par ses impacts négatifs à la fois sur la santé via une consommation excessive (au-delà de 500 g par semaine, ANSES, 2016) et sur les émissions importantes de gaz à effet de serre, elle est cependant une excellente source de protéines animales, de fer et zinc, mieux assimilés par notre corps que ceux issus des sources végétales. Aussi, la place de l'élevage est à revisiter. Quant au poisson, source également de protéines, il est recommandé pour sa richesse en acides gras oméga 3, dont la couverture des besoins est difficile à atteindre, c'est pourquoi sa part

dans une assiette équilibrée augmente. **Dans le cadre d'une gestion des pêches plus durables en Occitanie, des solutions sont à envisager pour maintenir les avantages nutritionnels des aliments d'origine aquatique et soutenir la durabilité de ces filières.** Il faut noter que nous n'avons pas besoin de plus de protéines ; au contraire leurs apports actuels devraient baisser de 40 %. Inverser le rapport protéines animales/protéines végétales serait encore plus bénéfique pour une réduction de plus de 50 % des émissions de gaz à effet de serre. La question des protéines végétales est relancée car elles coûtent moins cher sur le plan environnemental que les protéines animales. Le projet KING (« Knowledge and Innovation on Grain-legumes »), soutenu par la région, vise à identifier au sein des innovations de marché sur les légumineuses, celles pour lesquelles l'offre agricole et agroalimentaire peuvent être développées en Occitanie.

Le climat a un impact direct sur la dynamique de maladies infectieuses. Les facteurs climatiques comme la température et l'humidité influencent les processus de multiplication et de survie des agents pathogènes (Van Cauteren et al. 2018). L'initiative clé Alimentation Santé, soutenue par l'Université de Montpellier, souhaite analyser tous les facteurs, dont le climat, qui influent sur les risques sanitaires.

Le système de production, les modes de transports et l'urbanisation font partie d'un cercle vicieux associant des modes de vie peu sains et un impact environnemental important. Nos moyens de transport, dominés par la voiture, sont quant à eux associés à la sédentarité et à une faible activité physique, tout en générant entre 14 % et 25 % des émissions de gaz à effet de serre (Swinburn et al. 2019). Comprendre les comportements individuels en Occitanie devrait permettre de mieux cibler les solutions durables bénéfiques pour la santé humaine et écologique (voir **chapitre-enjeu Psychosocial**).

« One health » et « santé planétaire »

Le rapport de l'Homme à la nature s'est constitué autour d'une vision anthropocentrée et a contribué à envisager la place de l'être humain comme destinataire des ressources de la nature (Pierron, 2013). Cette vision utilitariste des ressources naturelles a toutefois encouragé la protection des ressources afin de permettre le maintien en bon état écologique des ressources pour satisfaire les besoins humains (eau, nourriture, matières premières etc.). Or, une nouvelle approche propose de reconstruire le lien entre le monde vivant « humain » et le monde vivant « non-humain », afin de mieux en cerner les dépendances et les interactions qui les lient. En termes de santé, l'approche One Health « vise à promouvoir une approche pluridisciplinaire et globale des enjeux sanitaires » (ANSES 2020), ce qui traduit la prise de conscience des liens étroits entre la santé humaine et la santé des autres espèces (faune et flore) de l'écosystème. Cette vision holistique de la santé, très utilisée dans le cas de l'étude des zoonoses, permet d'intégrer dans un même objectif les santés animale, environnementale et humaine, de manière à décloisonner les pratiques et les disciplines relatives à la santé. Le modèle de « santé planétaire » vise quant à lui à « prendre en compte l'influence des écosystèmes naturels et anthropiques sur la santé humaine, et à envisager la santé de la planète elle-même » (Santé Publique France, 2021) et permet de prendre en compte la santé humaine mais aussi la santé des écosystèmes dont elle dépend.

Post catastrophe, un temps de guérison des victimes au bénéfice des générations futures

Maryline CANNOU SPECHT (*Université de Paris*)

La transmission intergénérationnelle est un processus qui soutient la construction de la pensée d'un sujet. Ce processus se situe entre la construction singulière de la pensée propre d'un individu par lui-même et la co-construction de la pensée d'un individu dans son interaction avec d'autres. Elle est le processus par lequel la pensée est héritée et intégrée par un sujet à partir des modes de pensée des générations qui le précèdent. Si le parent maternel, la mère, le père, l'oncle ou la grand-mère, selon les traditions de maternage, est l'origine première de la transmission intergénérationnelle, l'ensemble de la généalogie, en tant que famille formant un système, est porteur de transmission. Tout événement est ainsi vécu en lien avec la transmission des modes de pensée d'une génération à l'autre. La transmission intergénérationnelle concerne d'autant plus les faits exceptionnels tels les traumatismes qui marquent les trajectoires de vie d'une génération. Il y a les victimes d'une guerre mais aussi les enfants de la guerre (Séguin, 2007).

Parmi les catastrophes naturelles, les inondations survenues les 18 et 19 juin 2013 en Occitanie ont marqué un territoire et sa population en raison de la violence des événements menaçant et emportant des vies humaines, du caractère exceptionnel de leur intensité, ainsi qu'en raison des dommages causés à l'environnement, aux aménagements et aux infrastructures (REX global, DREAL Occitanie). Toute inondation blesse des territoires comme des populations dans leur chair comme dans leur âme. Leur avenir partagé en porte longtemps les cicatrices, masquées ou révélées, révérees au centre d'une citée ou maudites dans des territoires d'exclusion, métamorphosées ou laissées en l'état. Les cicatrices seront des tabous ou des mémoires, des monuments

de centre-ville ou des restes qui s'oublient, des jardins réinventés ou des terrains vagues. Et dans le cœur des populations, elles porteront des noms, elles seront associées à des comportements de bravoure ou de honte, elles susciteront la fierté ou la crainte. Toutes ces formes de cicatrices composent un héritage et se transmettent de génération en génération.

Lorsqu'un désastre arrive, entre blessures et cicatrices, le temps de la guérison est pour une population entière comme pour une personne, un processus de reconstruction des facultés d'agir et de jouir de l'existence (Freud, 1904). C'est un temps précieux qui articule la reconstruction d'un contexte propice à une vie heureuse et des facultés de bonheur des populations. **Et c'est ainsi que l'héritage d'une catastrophe est intégré par les jeunes générations comme des façons de vivre avec bonheur dans une réalité qui comporte des dangers et des peines.** Elles s'appuieront alors, selon ce qui aura été retissé, sur les silences ou sur les souvenirs des victimes. Elles se forgeront d'oublis et d'ignorance parfois forcés ou de leçons transmises de l'histoire. Ces dernières s'ancreront de façon intangible comme des principes indiscutables ou ouvriront les portes de la résilience et de la créativité. Elles se nourriront d'honneur, de courage et de sens, elles se lesteront de honte et de culpabilité, s'envelopperont de peur ou encore apparaîtront comme des épreuves, individuelles ou collectives. Dans ce tissage que le sujet porte par lui-même et par héritage, le temps de la guérison est autant celui des victimes que celui des générations futures, parce qu'il importe qu'un désastre ne devienne pas le stigmate d'une région (Goffman, 1963).

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Une micro-ferme urbaine pour développer une alimentation saine et durable - 31

N.A.T.U.R.E.S. PRADETTES - *En savoir plus*

Le projet de création d'une micro-ferme urbaine - lauréat du budget « Toulouse je participe » en 2019 et du concours « Ma solution pour le climat » de la Région Occitanie en janvier 2021 et labellisé en septembre 2021 « ambassadeur du climat » par la Commission Européenne - consiste en l'aménagement d'un espace d'agriculture urbaine sur le quartier des Pradettes à Toulouse pour réapprendre à se nourrir sainement et de façon durable afin de préserver la santé et le climat. Le lieu d'implantation est une friche municipale située au cœur de la zone la plus densifiée et classée « quartier prioritaire politique de la ville ». Le projet est composé de trois pôles complémentaires :

- un pôle productif de maraîchage bio pour favoriser un autre mode de consommation des habitants. La production sera assurée dans un modèle professionnel ;
- un pôle pédagogique pour développer des actions de sensibilisation autour des questions d'agriculture, d'alimentation, de biodiversité, etc. ;

- un pôle social avec la création d'un jardin collectif pour favoriser les rencontres intergénérationnelles et culturelles, la mixité sociale et la solidarité. La création d'un jardin partagé est en cours.



Crédit photo : N.A.T.U.R.E.S. Pradettes

Santé et climat, le défi du XXI^e siècle

Genevève BRETAGNE (AUAT - LISST)

Dès 1946, l'OMS propose d'élargir la définition de la santé comme « un état de complet bien-être physique, mental et social, qui ne consiste pas seulement en une absence de maladie ou d'infirmité ». Plus « globale », cette approche renouvelée associe aux déterminants individuels et biologiques (âge, sexe, patrimoine génétique, comportement, ...) un ensemble de facteurs environnementaux, sociaux et/ou économiques, susceptibles d'influencer l'état de santé d'une population, de façon isolée, ou en association avec d'autres facteurs.

Considéré comme « le plus grand défi sanitaire du XXI^e siècle » par l'OMS en 2018 (WHO, COP24 Special report), relayant alors les alertes posées préalablement dans le 5^e rapport du GIEC (2014), le changement climatique est désormais considéré comme un déterminant de santé à part entière (Bélangier et al. 2019).

Il agit sur l'état de santé des personnes de façon directe (lors d'événements caniculaires ou de froid intense), mais aussi indirecte (émergence de nouvelles maladies engendrées par les modifications des écosystèmes et des cycles de développement des espèces), ou encore par l'influence sur d'autres déterminants et notamment les déterminants sociaux de santé (lors de la baisse ou la perte de revenus à l'occasion d'un épisode extrême par exemple) (figure 4.10 et 4.11).

Les conséquences sur la santé sont de plusieurs ordres :

- une augmentation des cas de morbidité et de mortalité liés à la survenue d'événements extrêmes : on peut citer à titre d'exemples les 1462 décès en excès suite aux deux canicules de 2019, heureusement loin derrière les 15 000 décès en excès déplorés en 2003 ;
- une augmentation des maladies infectieuses (zoonoses, maladies vectorielles, contamination de l'eau et des aliments) ;
- une augmentation et/ou une aggravation des pathologies cardiovasculaires et respiratoires (un lien étroit a été démontré entre changement climatique, pollution de l'air et santé), des allergies, de la malnutrition ;
- ainsi que des impacts psycho-sociaux, cependant moins documentés.

Ces effets sont fortement dépendants de la vulnérabilité des populations concernées, considérée au regard de leur exposition, leur sensibilité et leur capacité d'adaptation.

Pour autant, la santé apparaît aujourd'hui peu discutée au regard du déterminant « climat ». Plusieurs travaux convergent sur le fait que le changement climatique agit principalement par révélation ou exacerbation des vulnérabilités, pouvant alors renforcer des inégalités environnementales et sociales préexistantes. Il peut également conduire à des situations cumulatives d'effets directs et indirects sur la santé : épisode de chaleur souvent corrélé à des épisodes de pollution de l'air, vécu en situation d'isolement social. Pour autant, vulnérabilités physiologiques et socio-économiques ne concernent pas toujours les mêmes territoires et populations (Alonso et Renard, 2020).

Concernée à divers titres, **la région Occitanie commence à faire l'objet de quelques travaux d'exploration sur la problématique santé – climat** : par les acteurs des territoires dans le cadre des politiques publiques dont ils ont la compétence (urbanisme, social), ainsi que par les acteurs de la recherche.

On peut ainsi citer l'engagement récent (novembre 2020) du centre d'épidémiologie et de recherche en santé des populations (CERPOP – Inserm / Université Toulouse III – Paul Sabatier) dans le projet européen « Enhancing Belmont Forum research action to support EU policy-making on climate change and health » (ENBEL), réunissant des spécialistes de la recherche sur le changement climatique et la santé, et visant à accompagner l'élaboration de politiques européennes, internationales et nationales relatives aux économies sobres en carbone et au renforcement de la résilience climatique. Ce projet, financé jusqu'en 2023 par le programme Horizon 2020 de l'Union européenne, est coordonné par le Center for international climate research (CICERO) de l'Université d'Oslo (Norvège).

Plusieurs sujets représentés à travers le projet ENBEL pourront alors stimuler des actions de recherche répondant aux spécificités de la région Occitanie, comme l'estimation de l'exposition cumulée de la chaleur et des pollutions atmosphériques sur la santé des populations, notamment en milieux urbains ; la caractérisation des facteurs de vulnérabilités des populations au regard des aléas climatiques ; l'estimation de l'effet des mesures d'atténuation et d'adaptation en termes de santé et d'inégalités sociales de santé ; ou encore la mesure de l'évolution des maladies infectieuses au regard des évolutions climatiques et des caractéristiques des populations (voir **chapitre-enjeu Milieux urbanisés**).

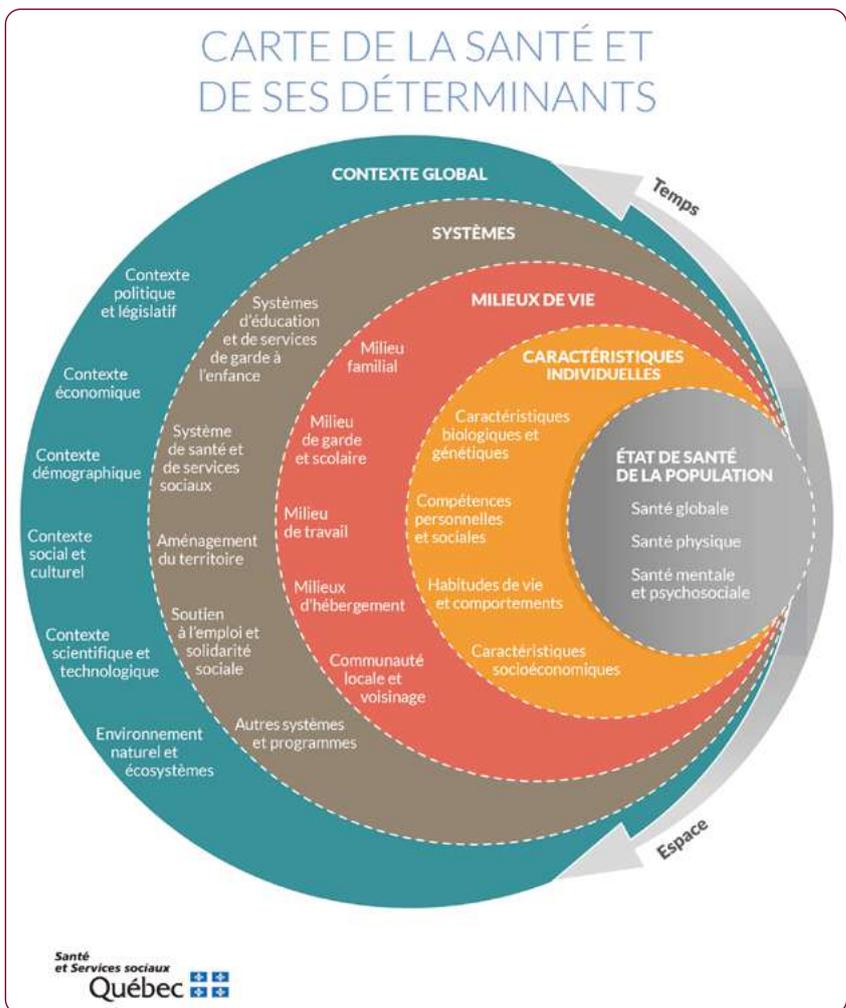


Figure 4.10. Carte de la santé et de ses déterminants. (Source : Ministère de la Santé et des Services Sociaux du Québec, 2010)

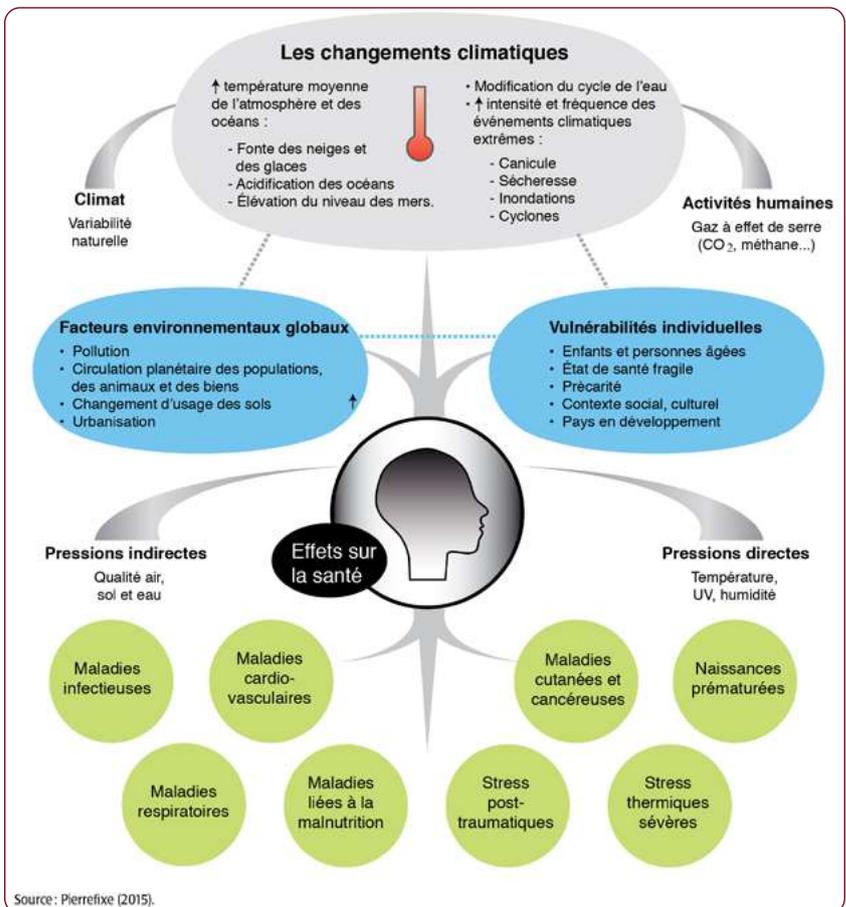


Figure 4.11. Les effets des changements climatiques sur la santé des individus, en tenant compte des facteurs environnementaux globaux et des vulnérabilités individuelles. (Source : Pierrefixe, 2015)

Surveillance et anticipation des impacts sanitaires des changements climatiques

Face à des risques croissants, des changements climatiques à l'ampleur incertaine, et aux vulnérabilités des populations et des territoires, la création d'indicateurs d'adaptation est un moyen efficace pour diffuser de l'information scientifique (« qualité scientifique »), claire et compréhensible auprès de publics hétérogènes et non issus du milieu sanitaire (« qualité pédagogique »), d'aider les instances décisionnaires nationales et surtout locales dans leurs processus de décision (« qualité décisionnelle »). Les « indicateurs d'effets sanitaires du changement climatique » permettraient donc de prioriser les besoins en termes d'adaptation mais aussi d'évaluer l'efficacité des actions (Santé Publique France, 2021). La chaîne présentée en **figure 4.12** présente les différentes synergies entre le danger, le facteur de risque, l'exposition, et la vulnérabilité, qui aboutiront à un niveau d'impact pour une population et un territoire donnés, et pour lequel des stratégies d'adaptation peuvent être mises en œuvre (l'intervention). Pour chaque élément, Santé Publique France préconise de développer des indicateurs (danger, exposition, vulnérabilité, impact et intervention) déclinés à l'échelle locale, afin qu'ils soient adaptés aux enjeux des territoires et « déclinables à une échelle opérationnelle pour la décision ». Certaines limites demeurent dans la déclinaison locale des indicateurs, telles que le manque de disponibilité ou d'interprétabilité des données, ou encore leur coût de production (Santé Publique France, 2021).

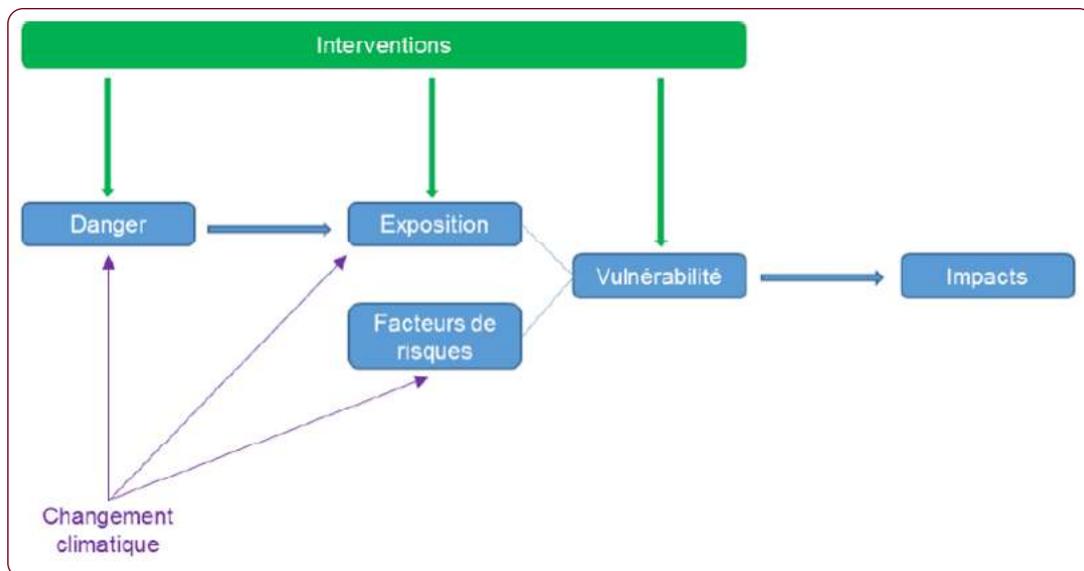


Figure 4.12. Schématisation de la chaîne allant du danger aux impacts et permettant d'identifier des influences possibles du changement climatique et les possibilités d'adaptation (interventions). (Source : Santé Publique France, 2021).



CROCC_2021

PARTIE
MILIEUX





CHAPITRE

5

**MILIEUX
URBANISÉS**

Coordination : Julia HIDALGO et Christiane WEBER

Rédaction : Karine ADELIN, Rahim AGUEJDAD, Hassan AIT HADDOU, Eric BARBE, Marion BONHOMME, Geneviève BRETAGNE, Xavier BRIOTTET, Carole DELENNE, Sophie FABRE, Sébastien GOURDIER, Sinda HAOUES-JOUVE, Julia HIDALGO, Valéry MASSON, Aurélie MICHEL, Gabriel POUJOL, Guillaume SIMONET, Magalie TECHER, Gwladys TOULEMONDE, Christiane WEBER.

Contexte

Julia HIDALGO (CNRS - LISST), Christiane WEBER (CNRS - TETIS)

Quatre ensembles géographiques utiles à l'analyse territoriale

Les territoires artificialisés (tissu urbain et espaces verts associés, zones d'activités et d'équipements, infrastructures de transport) représentent en Occitanie environ 4 % du territoire régional et se concentrent très fortement sur le littoral et dans les plaines. Un regroupement en quatre grands ensembles sur la base d'entités paysagères est couramment utilisé pour l'analyse des dynamiques d'accueil et de construction, d'habitat et de consommation foncière (**figure 5.1**) :

- le Massif central et ses contreforts (35 % de la superficie régionale), dont la Montagne Noire et les Cévennes constituent l'extrémité méridionale ;
- la plaine de la Garonne et les coteaux (29 %) ;
- le massif pyrénéen et ses contreforts (19 %), dont les Corbières forment le massif de piémont le plus vaste ;
- les plaines, garrigues et littoral méditerranéens (17 %).

3 habitants sur 4 vivent au sein de territoires urbains

Les 43 grandes et moyennes aires urbaines regroupent 74 % de la population régionale et les espaces à dominante rurale et les petites aires urbaines représentent 26 % (soit environ 4 millions d'habitants et 1,5 million d'habitants respectivement). Parmi les aires d'attraction des villes, trois groupes se dégagent mais cachent des disparités importantes en nombre d'habitants et donc en superficie communale (**figure 5.2**). Les deux villes-centres des métropoles ont des populations bien supérieures aux autres avec pour Toulouse environ 1,5 millions et pour Montpellier environ 800 000 habitants. Des villes comme Perpignan et Nîmes ont une aire d'attraction variant entre 300 000 et 400 000 habitants. Et ensuite, neuf autres - Béziers, Narbonne, Montauban, Albi, Tarbes, Alès, Carcassonne, Rodez et Castres - ont des aires d'attraction qui dépassent les 100 000 habitants (**INSEE, 2018**).

Une amplification significative du fait urbain

Entre 2013 et 2018, la région gagne en moyenne 40 300 habitants par an (+0,7 %) et cette dynamique profite avant tout aux principales villes. Au sein de la région, les territoires constituant l'armature urbaine concentrent l'essentiel du dynamisme démographique. Celui-ci est très marqué dans l'agglomération toulousaine (+1,3 % par an entre 2013 et 2018) et encore plus dans celle de Montpellier (+1,6 %). La dynamique toulousaine se répercute jusqu'à certaines agglomérations proches comme Montauban (+1,1 %), Graulhet (+1,5 %) ou Gaillac (+1,2 %). Plus à l'est, le dynamisme démographique s'observe surtout le long de l'autoroute A9 dans le cha-

pelet d'agglomérations du littoral méditerranéen entre Nîmes et Perpignan, comme Lunel, Agde, Béziers ou encore Narbonne.

Les espaces sous influence urbaine ne cessent de s'étendre et d'accueillir des habitants et ceci depuis les années 1990. Cette expansion spatiale s'opère avant tout dans les couronnes périurbaines caractéristiques de l'étalement urbain amorcé lors des décennies précédentes. Ce phénomène de desserrement du bâti en périphérie s'accompagne également d'un renforcement de l'accueil de population dans les centres urbains. Cette attractivité devrait se perpétuer au cours des trente prochaines années même si un léger fléchissement est constaté depuis 2013. **Le scénario central de l'INSEE prévoit pour l'Occitanie une population d'environ 7 millions d'habitants en 2050, soit une croissance d'environ 20 % entre 2016 et 2050 (INSEE, 2018).**

Risques climatiques et zones urbanisées en Occitanie

L'accroissement de la population urbaine combiné à son étalement accroît l'exposition à divers aléas naturels et intensifie les risques auxquels les populations sont exposées. Le peuplement croissant du littoral expose les habitants et les touristes aux risques d'érosion de la ligne de côte et de submersion des zones basses, ce qui menace certaines activités vitales pour la région, comme les activités conchylicoles. La perspective d'intensification des épisodes méditerranéens constitue un risque supplémentaire compte tenu d'une urbanisation diffuse. Les événements extrêmes (pluies, inondations, vagues de chaleur...) impactent fortement les zones de peuplement ; divers aléas comme le retrait-gonflement des argiles qui endommage les structures bâties, ou les départs de feux à proximité de lieux d'habitation, mettent le territoire en tension. Les pressions liées aux changements climatiques impactent et vont impacter le métabolisme des territoires au travers des sources d'approvisionnement (agricoles, forestières, alimentaires) et de l'allocation des ressources notamment la ressource en eau essentielle aux activités (résidentielles, économiques et de loisirs). Enfin, en milieu urbain l'augmentation de l'intensité, durée et fréquence des vagues de chaleur combinées à l'effet d'îlot de chaleur urbain constitue un risque composite qui rend de plus en plus difficile la gestion du confort d'été dans cette région du sud de la France.

Une prise en compte du climat nécessaire dans la planification et l'aménagement urbains et les recherches associées

Les nouveaux aménagements urbains ne peuvent pas être planifiés dans l'ignorance de ces risques liés à l'évolution du climat à grande échelle et du microclimat urbain

créé par la ville elle-même et par l'évolution réglementaire régulant les obligations des collectivités locales. Du point de vue de la recherche, de nouvelles questions interdisciplinaires doivent être adressées : comment gérer l'accroissement de la demande de confort thermique en été dans le sud de la France ? Comment favoriser des choix d'aménagement privilégiant des espaces de végétation dans un marché foncier en tension ? Comment allouer une répartition de la ressource en eau de manière efficace ? Comment mettre en place des pratiques « sobres » en énergie dans un monde connecté ?

Dans ce chapitre sont abordés divers points permettant de comprendre le contexte climatique des zones urbanisées et les différents leviers d'action (figure 5.3). Le rôle joué par l'îlot de chaleur urbain (ICU), les formes urbaines, les matériaux et les activités anthropiques sont autant de points d'entrée à la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu dans le climat (rayonnement, convection, conduction, écoulement d'air, transport, diffusion de l'humidité et changement de phase) et de processus sociaux concernés (activités anthropiques et usages).

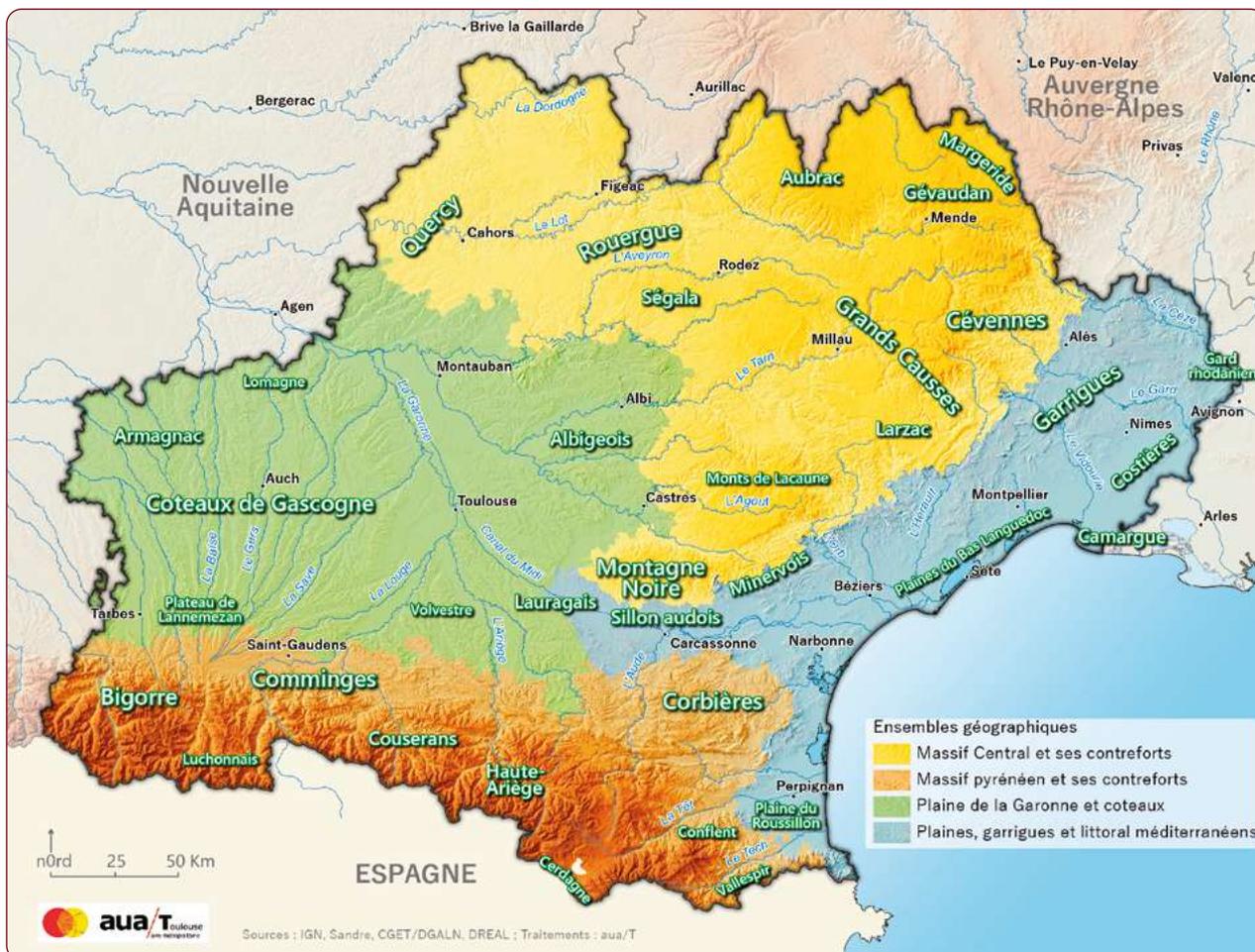


Figure 5.1. Principales villes et grands ensembles géographiques. (Source : Dynamiques d'Occitanie, 2017).

	Population 2018	Population 2013	Évolution annuelle moyenne (%)	
			2013-2018	2008-2013
Toulouse	1 433 656	1 344 018	+ 1,3	+ 1,4
Montpellier	787 705	733 465	+ 1,4	+ 1,5
Perpignan	411 617	397 576	+ 0,7	+ 1,2
Nîmes	345 670	338 795	+ 0,4	+ 1,4
Béziers	194 901	186 300	+ 0,9	+ 1,5
Narbonne	154 026	148 437	+ 0,7	+ 1,3
Montauban	139 537	133 965	+ 0,8	+ 1,3
Albi	137 494	135 528	+ 0,3	+ 0,5
Tarbes*	135 654	132 562	+ 0,5	+ 0,1
Alès	129 163	127 490	+ 0,3	+ 0,7
Carcassonne	123 863	122 236	+ 0,3	+ 0,7
Rodez	111 885	109 064	+ 0,5	+ 0,6
Castres	104 592	104 472	+ 0,0	+ 0,1

Figure 5.2. Population des aires d'attraction des villes d'Occitanie de plus de 100 000 habitants (dont la commune centre est située dans la région). (Source : INSEE, 2018).

* y compris les communes situées en dehors de la région.

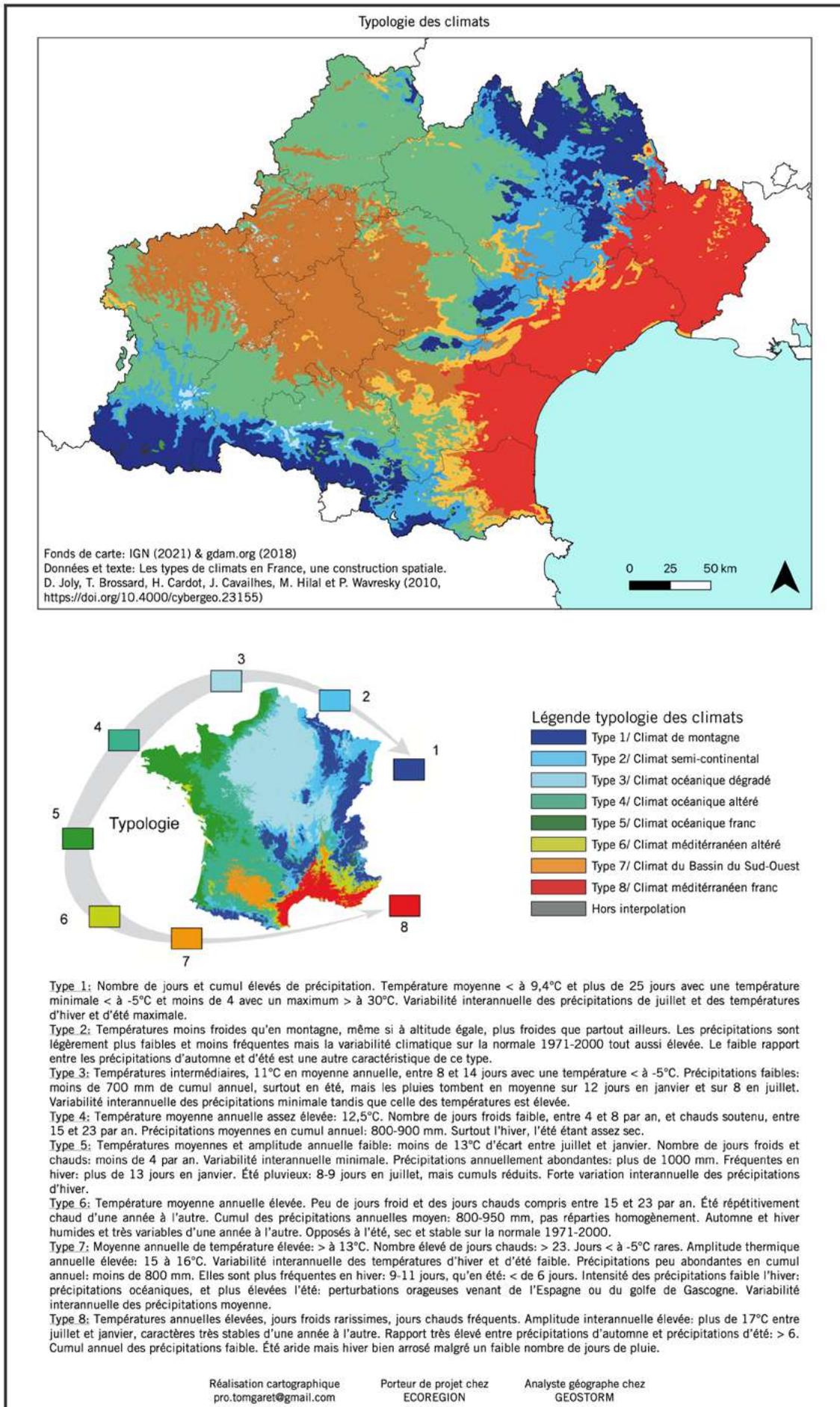


Figure 5.3. Typologie climatique sur la France.
(Source : Joly et al., 2010, cartographie réalisée par Tom Garet pour le CROCC_2021)

1. Le rôle actif et passif des milieux urbanisés face au climat. L'importance de quantifier l'îlot de chaleur urbain

Valéry MASSON (*Météo-France et CNRS - CNRM*), Aurélie MICHEL (*ONERA*)

Les milieux urbanisés sont, du point de vue météorologique, des objets petits comparés à la fois aux systèmes de grande échelle qui influencent le temps et le climat (océans, continents, chaînes montagneuses, anticyclones et dépressions) et aux caractéristiques plus régionales (zones côtières avec brises de mer, forêts, vallées, etc.). Cependant, ils concentrent la majorité de la population mondiale, des biens, des infrastructures et un bon nombre d'activités anthropiques. Ces espaces jouent donc un rôle actif sur la modification du climat à grande échelle de par leur contribution aux émissions des gaz à effet de serre (GES) et en même temps sont soumis à ses divers impacts (vagues de chaleur, sécheresse, montée du niveau de la mer...). En plus, la modification importante de l'occupation du sol et de la rugosité affecte localement quasiment toutes les variables météorologiques (température, humidité, vent, précipitation...) et les villes influencent ainsi de manière significative le climat local créant, par exemple, le phénomène de l'îlot de chaleur urbain (Oke et al., 2017).

L'îlot de chaleur urbain décrit une différence de température de l'air entre le centre-ville, et les quartiers urbains en général, et les zones rurales autour de la ville. L'îlot de chaleur urbain de l'air est en général inexistant en journée, mais peut atteindre 5 °C certaines nuits dans les grandes agglomérations de la région, et affecte même des petites villes de moins de 5000 habitants. Il est dû à l'imperméabilisation des surfaces : la chaleur reçue du soleil pendant la journée chauffe les matériaux urbains (pierre, béton, tuiles, etc.). En début de soirée et la nuit, cette chaleur est rendue à l'atmosphère, ce qui limite le refroidissement de l'air.

Ainsi, contrairement à ce qui est souvent cru, ce phénomène n'est pas lié au changement climatique, comme le prouve cette citation de Maupassant dans *Bel-ami* en 1855 : « Ils prirent un fiacre découvert, gagnèrent les Champs-Élysées, puis l'avenue du Bois-de-Boulogne. C'était une nuit sans vent, une de ces nuits d'étuve où l'air de Paris surchauffé entre dans la poitrine comme une vapeur de four ». Au passage, l'on peut remarquer que Maupassant souligne l'impact sanitaire de l'îlot de chaleur urbain lors des périodes caniculaires. Or **ces épisodes caniculaires vont se multiplier dans le futur, et le fait que le climat soit déjà chaud sous nos contrées, explique que le confort d'été en ville est devenu une priorité en termes d'adaptation au changement climatique de nombre de villes de la région Occitanie.**

Quantifier l'îlot de chaleur urbain est donc une nécessité pour les collectivités urbaines. Des réseaux de stations météorologiques permettent de monitorer l'îlot de chaleur en temps réel. C'est le choix qui a été fait par Toulouse Métropole, qui a installé 70 stations sur son

territoire, connectées par l'internet des objets. Cette approche a l'avantage de fournir des données en continu, tous les jours de l'année plusieurs fois par heure, mais le nombre de stations est forcément limité. Un moyen souvent utilisé par les bureaux d'études est d'avoir recours à la télédétection pour obtenir des images de température de surface à partir d'avions, drones ou satellites. L'avantage de la télédétection, surtout spatiale, est de pouvoir offrir une grande quantité d'images sur une couverture mondiale quasi-globale, et surtout à haute résolution spatiale (quelques dizaines de mètres).

Les images satellite sont réalisées à intervalle régulier (lors du passage du satellite), tous les quelques jours à quelques semaines, mais les images ne sont exploitables qu'en période de ciel clair (sans nuage). Elles permettent de repérer des zones où la surface est fraîche, typiquement les surfaces en herbe et les arbres. Historiquement, c'est le satellite NOAA-AVHRR-1 lancé en 1979 qui a permis de démarrer ces mesures et études.

Il convient toutefois de souligner, comme cela est illustré dans la **figure 5.4, que les températures de l'air et de surface sont très différentes, et que l'îlot de chaleur observé en journée par satellite n'a pas de rapport avec l'îlot de chaleur nocturne de l'air.** Ainsi, une thèse récente (Dumas, 2021), a montré à partir du réseau de monitoring de Toulouse Métropole que les zones industrielles et commerciales, très minéralisées, ne sont pas des zones de surchauffe de l'air par rapport aux autres quartiers comme ce que l'on croit généralement quand on se base sur les températures de surface uniquement (du fait de l'échauffement du bitume). Les deux informations, air et surface, sont donc complémentaires, mais ne doivent pas être confondues, ce qui est encore malheureusement trop souvent le cas.

Les stratégies d'adaptation en ville sont variées, et couvrent une large gamme à la fois d'échelles et d'acteurs. Les comportements individuels dans son logement, comme fermer les volets les jours de grande chaleur, est une adaptation naturelle et ancrée dans nos territoires du Sud. Toutefois, une stratégie d'adaptation, mais comportant de nombreux défauts, est le recours à la climatisation : non seulement elle consomme de l'énergie et contribue de ce fait au réchauffement climatique global, mais localement, la chaleur rejetée réchauffe encore – quoique légèrement, avec le taux d'équipement actuel, moins de 1 °C - l'air extérieur. Ainsi, il est préférable de rénover le bâti, de favoriser les couleurs claires pour les parois lorsque cela est possible (comme les villages blancs en Andalousie), limiter les grandes surfaces vitrées à l'ouest dans les constructions neuves, et utiliser de nouvelles, ou plutôt anciennes, techniques de construction utilisant des matériaux biosourcés en lieu et place des parpaings et bétons.

Au niveau de l'urbanisme, mettre en place des trames vertes et bleues, et des parcs permet d'inclure dans la ville des espaces de fraîcheur. Les solutions végétales technologiques, comme les toitures végétalisées, ont

toutefois un impact tout relatif sur le refroidissement, du fait d'une part de leur localisation (sur les toits) et surtout de l'assèchement rapide des substrats en période caniculaire. On préférera les arbres et plantes en pleine terre.

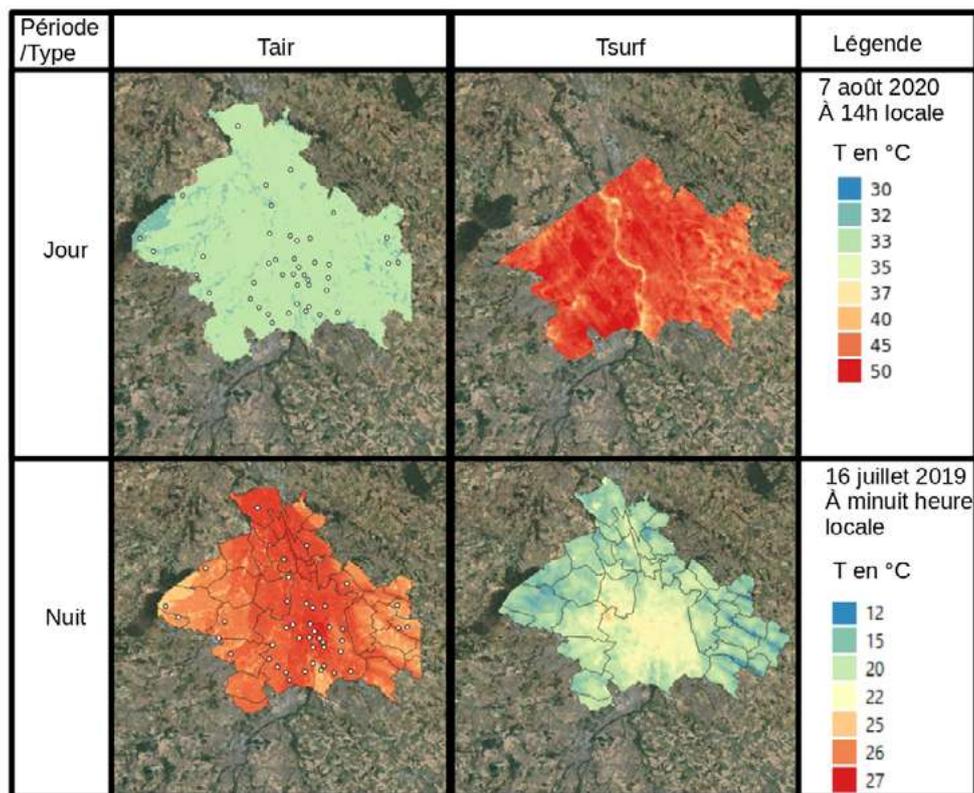


Figure 5.4. Exemple, sur le territoire de Toulouse Métropole, de données de température de l'air (gauche), mesurée en temps réel toutes les 15 minutes par le réseau de stations météorologiques de Toulouse Métropole (les stations sont indiquées par les ronds) et de température de surface (droite), mesurées par le satellite Ecostress.

Les cartes sont produites pour une journée et une nuit d'été de ciel clair où les données satellites étaient disponibles (7 août 2020 à 14h locale et le 16 juillet 2019 à minuit locale, respectivement). Pour le jour (ou la nuit), les gammes de couleur de températures sont identiques pour les températures de l'air et satellite, ce qui permet de les comparer. Ces cartes indiquent clairement que les températures de l'air et de surface sont totalement différentes et ne doivent pas être confondues. Ainsi, une donnée d'image satellite de température ne peut pas donner d'information sur la température de l'air et l'îlot de chaleur urbain associé.

(Source : réalisation de A. Michel et G. Dumas pour le CROCC_2021).

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Un projet de requalification urbaine pour créer un îlot de fraîcheur sur un ensemble scolaire - 31

Mairie de Tournefeuille - [En savoir plus](#)

La Ville de Tournefeuille réalise un schéma d'atténuation et d'adaptation au phénomène « d'îlot de chaleur », ciblé en premier lieu sur les écoles. La démarche a commencé par la réalisation d'une étude d'envergure de par son périmètre sur un îlot de 8 ha (Quartier de Labitrie) qui englobe un groupe scolaire, un collège et leurs espaces attenants (parkings, abords, etc.). Un schéma de désartificialisation, végétalisation et d'interventions sur le bâti a été réalisé dans une démarche de requalification systémique des enjeux - cycle de l'eau, biodiversité, mobilités, santé et bien-être... - en cohérence avec les usages de chaque espace. La communauté éducative, les élèves, les personnels, les parents d'élèves, les associations, etc. (environ 200 personnes) ont activement participé à la définition du projet, depuis le diagnostic initial jusqu'aux propositions de réaménagement des différents espaces de vie (solutions concrètes avec des palettes végétales adaptées au climat futur et à faible coût d'entretien par exemple). Le plan d'action a été élaboré avec le souci de mobiliser des solutions « sobres » et économes en fonctionnement.

Cette étude s'est achevée en juillet 2021 et le projet se réalisera selon un programme pluriannuel.



Projet d'Oasis de fraîcheur sur l'îlot groupe scolaire du Petit train / Collège Labitrie
 Conception : Jean-Yves Puyo, Architecte-Urbaniste / Pascalte Rossard, Facilitatrice en Intelligence collective / Alexandra Raybaud Ing. Paysagiste

projet qui s'inscrit dans
 une logique de
 SaïTN

2. L'architecture et l'aménagement des espaces publics au service du confort extérieur

Marion BONHOMME (INSA - LMDC)

Nous allons aborder dans cette section l'influence du bâti sur le confort extérieur et comment il peut être un levier d'action.

Influence des matériaux

Les matériaux de construction des bâtiments (murs, vitrages, toits, etc.) et les revêtements extérieurs (pavés, enrobés, graviers, etc.) contribuent à l'îlot de chaleur urbain en raison de certaines de leurs propriétés physiques, parmi lesquelles : l'albédo, l'inertie et la perméabilité (figure 5.5).

• L'albédo

L'albédo correspond au rapport entre l'énergie solaire réfléchi et l'énergie solaire reçue par une surface. L'albédo des matériaux urbains est globalement plus faible que celui des matériaux que l'on trouve à la campagne, c'est-à-dire qu'ils absorbent une plus grande part de l'énergie solaire reçue. Ces matériaux montent donc en température de manière plus importante (Prado & Ferreira, 2005). Les surfaces claires ayant un albédo plus élevé que les surfaces aux couleurs sombres, ce phénomène nous permet d'expliquer le choix d'enduits clairs dans l'architecture vernaculaire de certaines villes méditerranéennes. En revanche, une attention particulière doit être portée au risque d'éblouissement lié à ces matériaux très clairs. Notons également que l'albédo des surfaces horizontales aura un impact plus important sur le microclimat urbain que celui des parois verticales. Il y a donc un intérêt particulier à se concentrer sur les matériaux de toitures.

De récents travaux de recherche ont conduit au développement de matériaux aux propriétés radiatives particulières : les peintures à forte émissivité ou encore les « cool roofs » qui réfléchissent une grande part du rayonnement solaire reçu et montent très peu en température (Synnefa et al., 2008). Le projet de recherche EPICEA a permis, via des modélisations à l'échelle de la ville de Paris, d'évaluer l'impact de l'albédo des matériaux urbains sur la température de l'air dans la rue. Dans un scénario où les routes, murs et toits ont été modélisés comme très clairs (avec un albédo de 0,9 pour les toits en particulier), la température à l'intérieur de la canopée urbaine a été réduite de 1 °C (Koukoku-Arnaud, 2012).

• L'inertie

L'inertie caractérise la capacité d'un matériau à accumuler la chaleur et à la restituer après un temps. L'inertie des matériaux urbains est généralement plus élevée, ils absorbent donc la chaleur pour la restituer en période nocturne, empêchant le rafraîchissement de la ville (Grimmond & Oke, 1999). Notons qu'à l'inverse, l'inertie des bâtiments peut être favorable au confort intérieur d'été. Un bon compromis peut être l'isolation par l'extérieur qui limite l'inertie accessible côté rue et maximise

l'inertie à l'intérieur des bâtiments. Dans le cadre du projet **ENERPAT**, des travaux de mesures et de modélisation menés dans la ville de Cahors ont montré qu'une isolation par l'intérieur dans le centre ancien pouvait dégrader le confort d'été (Claude et al. 2019). La suite de ces travaux devrait permettre de proposer des techniques de réhabilitation basées sur des matériaux biosourcés. Ces matériaux permettraient de réduire les besoins de chauffage sans dégrader le confort d'été à l'intérieur comme à l'extérieur des bâtiments.

• La perméabilité

Les revêtements de sol en ville sont plus imperméables que les terrains non urbanisés et réduisent donc l'humidité de l'environnement, limitant ainsi le phénomène de rafraîchissement par évaporation.

Influence de la morphologie

La morphologie urbaine - c'est à dire, la forme des bâtiments et leur agencement les uns par rapport aux autres - influe sur le bilan énergétique de la ville de différentes manières.

• Ombrage et piégeage radiatif

Les ombres des bâtiments et des arbres limitent la montée en température des matériaux urbains. Elles limitent également le rayonnement direct sur les piétons et jouent un rôle particulièrement important dans la sensation de confort. Ce phénomène est cependant contrebalancé par le phénomène de piégeage radiatif : dans une forme urbaine où les bâtiments sont hauts et rapprochés, les rayons solaires vont subir de multiples réflexions et vont réchauffer les surfaces et l'air à l'intérieur de la rue. À titre d'exemple, dans le cadre de la conception de la ZAC Toulouse Montaudran Aerospace, une étude a montré que **la modification de la morphologie urbaine n'était pas un levier d'action facilement mobilisable** : si augmenter la hauteur des bâtiments conduit à produire plus d'ombres, cela peut aussi augmenter le piégeage radiatif (Martins et al., 2016).

Dans le cadre du projet **MApUCE**, une étude menée par Gardes et al. (2020) sur 42 villes françaises a permis de croiser des modélisations de l'îlot de chaleur urbain à l'échelle des agglomérations à des facteurs explicatifs, en particulier les formes urbaines décrites par la typologie Local Climate Zones (LCZ). L'étude a montré que les formes urbaines compactes favorisent la formation de l'îlot de chaleur urbain. Notons que ce résultat peut aussi être expliqué par le fait que ces formes urbaines sont globalement moins végétalisées.

• Écoulement de l'air

L'écoulement de l'air est modifié en milieux urbains. Le vent est globalement ralenti, sa direction est modifiée et des flux turbulents sont générés.

Ces phénomènes dépendent beaucoup de l'orientation des bâtiments par rapport aux vents dominants. On peut conclure que dans le cas d'une ville dense aux rues sinueuses, la vitesse du vent est diminuée et la chaleur de la ville est moins aisément dispersée.

• Structure urbaine

La répartition spatiale des bâtiments à l'échelle d'une ville a également une influence sur l'îlot de chaleur urbain. Une étude statistique menée sur les 5 000 plus grandes villes d'Europe a permis d'établir un lien entre la forme et la taille de la tache urbaine et l'intensité de l'îlot de chaleur urbain (évaluée grâce à des mesures de température de surface) : une ville peu compacte, de petite taille et dont la forme est plutôt allongée aura tendance à moins monter en température (Zhou et al., 2017). En France, l'étude menée par Gardes et al. (2020) dans le cadre du projet MAPuCE est parvenue à des conclusions similaires quant à la relation taille démographique / ICU des villes. L'îlot de chaleur maximum augmente avec le logarithme de la population totale des agglomérations françaises étudiées.

Influence des émissions de chaleur anthropique

La chaleur anthropique est celle produite par les activités humaines : chauffage, climatisation, transports et activités industrielles, particulièrement concentrées en milieu urbain. Les systèmes de climatisation représentent un enjeu particulièrement sensible : s'ils permettent de garantir une situation de confort intérieur en cas de canicule, leurs rejets de chaleur contribuent néanmoins à réchauffer encore davantage la ville, suscitant une utilisation accrue de la climatisation et entretenant ainsi un cercle vicieux. Des travaux menés sur la ville de Paris montrent que doubler les installations de climatiseurs conduirait à des élévations de températures allant jusqu'à 2,5 °C (Tremeac et al., 2012). Cette même étude oriente les concepteurs vers des choix de systèmes de rafraîchissement tels que les tours de refroidissement humides, les climatiseurs à eau perdue ou les puits canadiens qui contribuent beaucoup moins à l'îlot de chaleur urbain. Lorsque cela est possible, les solutions de rafraîchissement passif seront privilégiées (protections solaires, ventilations nocturnes, etc.).

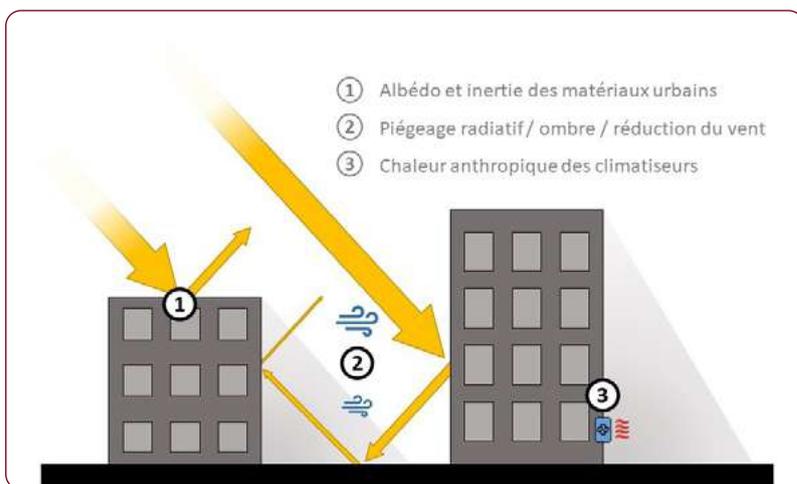


Figure 5.5. Influence du bâti sur le confort extérieur, principaux mécanismes. (Source : réalisation de M. Bonhomme)

3. L'architecture et l'aménagement des espaces publics au service du confort extérieur

Hassan AIT HADDOU (LIFAM - ENSAM), Rahim AGUEJDAD (UMIFRE 21 CNRS - MEAE), Magalie TECHER (ENSAM - LIFAM)

Le parc bâti devra faire face aux divers aléas climatiques et leur évolution, en particulier les canicules et la hausse généralisée des températures moyennes qui ont deux impacts majeurs à cette échelle : le retrait gonflement des argiles qui impacte leur structure, et la dégradation du confort intérieur. Les collectivités territoriales sont en première ligne pour relever ces défis qui interrogent la gouvernance, la réglementation, le foncier, la recherche, la réhabilitation du parc existant, la conception des bâtiments futurs ainsi que les comportements et les usages (Aulagnier, 2015).

Cette section fait un focus sur les recherches en lien avec les questions de confort intérieur et bien-être. Des approches transversales, multi-échelles et multi-acteurs

sont de plus en plus développées avec des focus très techniques autour de l'ingénierie du bâtiment (techniques constructives ou de rénovation par exemple) mais aussi sur les questions socio-psychologiques au niveau de l'acte d'habiter (Aulagnier, 2015).

Par ailleurs, nous assistons à une transition sociétale vers une généralisation du « tout numérique », l'introduction des environnements intelligents et la démocratisation de la donnée, ce qui impacte la manière de pratiquer et de vivre la ville (Ait Haddou, 2021). La surveillance et le contrôle en temps réel de la consommation d'énergie, l'Internet des objets (IoT) et l'analyse des lacs de données font désormais partie de plus en plus des habitudes des habitants et des usagers.

Trois programmes de recherche ont récemment démarré sur ce sujet croisant trois niveaux d'analyse, c.-à-d. macro, méso et micro :

- le programme POPSU Métropoles qui vise dans un de ses axes à formuler des recommandations sur comment introduire une « pensée numérique » dans les stratégies de développement urbain en lien avec les transitions numérique et écologique dans des environnements sociaux et économiques complexes ;
- les travaux de recherche menés sur la Métropole de Montpellier dans le cadre d'une thèse ADEME, qui interrogent l'impact des politiques de développement territorial sur les performances énergétiques et l'îlot de chaleur urbain à l'échelle de l'îlot, en utilisant une approche réglementaire et des outils de modélisation prospective et paramétrique ;
- le troisième programme, HUman at home project (projet HUT), est un projet de recherche pluridisciplinaire qui réunit une dizaine de laboratoires universitaires de recherche, des industriels et des institutionnels pour étudier les interactions « humain-humain » et « humain-objet ».

L'un des objectifs de ce projet consiste à mieux cerner la question du confort thermique, l'efficacité énergétique et les mécanismes juridiques, sociaux et psychologiques qui régissent les comportements des occupants, leur acceptabilité et leur appropriation des nouvelles technologies dans un environnement connecté. Il s'agit d'envisager à quoi pourrait ressembler la ville intelligente de demain en étudiant le comportement locomoteur dans les différents espaces du logement via un bâtiment observatoire où sont installés des capteurs d'ambiance (luminosité, température, humidité, CO₂), de consommation d'eau et d'électricité, d'ouvertures et fermetures de portes et fenêtres, ainsi qu'un sol connecté.



Figure 5.6. Simulation de la lumière dans l'appartement HUT (Human at home project).
(Source : Stage recherche J. Jocteur et H. Ait Haddou, LIFAM 2019)

Dans le cadre du programme HUT, le sous-projet Walk@Home, piloté par le directeur d'Euromov Benoit Bardy, vise à étudier le comportement locomoteur des habitants et à modéliser les trajectoires locomotrices en utilisant les données issues du sol connecté (Sannier, 2021). Afin de confronter les données mesurées et celles simulées, une maquette numérique 3D de l'appartement HUT a été produite. Une simulation thermique dynamique a également été menée pour réaliser un prototype de la répartition lumineuse naturelle de l'appartement.

Les enquêtes qualitatives et quantitatives menées dans le cadre d'un autre sous-projet du projet HUT ont mis en évidence la nécessité d'un arbitrage entre le confort et l'économie d'énergie. **Il s'agit avant tout de « valider le fait que la maison de demain devrait apporter un soutien logistique propice au bien-être ».** Il s'agit également de « déléguer aux objets connectés des actions qui annihilent l'habitude d'une pratique écologique qui devrait être une priorité pour chaque individu ».

Ces premiers résultats du projet HUT viennent en complément des résultats d'autres programmes de recherche tels que le programme ADREAM du LAAS-CNRS à Toulouse qui propose un bâtiment expérimental dédié à l'optimisation énergétique et à l'intelligence ambiante. Par ailleurs, des résultats notables sont déjà publiés dans le cadre d'une thèse (Gallissot, 2012) qui esquisse les premières solutions concernant la technologie de l'habitat intelligent pouvant contribuer à l'amélioration du confort.

Pour conclure, **étudier la consommation d'énergie et les stratégies d'adaptation passe aussi par l'étude des usages et des comportements des usagers dans un monde du tout numérique.** Pour garantir une meilleure optimisation énergétique, il est également nécessaire de **redéfinir la notion du confort pour tenir compte des évolutions technologiques et de l'arrivée des IoT dans le domaine de l'architecture et de la ville intelligente (figure 5.6).**

4. Adaptation climatique par la végétalisation

Karine ADELIN (ONERA), Sophie FABRE (ONERA - DOTA), Xavier BRIOTTET (ONERA), Christiane WEBER (CNRS - TETIS)

Tous les processus écologiques sont affectés par le climat : la distribution des organismes, le développement des sols, la disponibilité de la ressource en eau ou encore la variabilité temporelle et spatiale des processus écologiques. Le changement climatique influence donc tous ces processus et éléments avec plus ou moins de vigueur. Cependant la végétation en milieu urbain peut favoriser une atténuation des effets du changement climatique sur la santé en améliorant le confort du citadin (qualité de l'air, lien social, aménités), les équilibres naturels et la qualité de l'environnement (biodiversité, régulation thermique, qualité de l'air, écoulement des eaux et protection des sols) et l'économie urbaine (par la valorisation du bâti, des produits végétaux, l'agriculture urbaine et l'attractivité du territoire). La végétation rend donc divers « services » au travers de son fonctionnement naturel ou de sa mise à disposition dans l'espace urbain.

La végétation comme contributeur microclimatique et climatique

Le rôle de la végétation dans la régulation du climat est largement reconnu notamment à l'échelle de la ville car il permet d'atténuer l'influence de l'activité humaine sur son environnement.

• Îlot de chaleur / îlot de fraîcheur

Suite à la vague de chaleur en Europe en 2003, l'opinion publique a pris conscience de l'impact du réchauffement climatique dans les villes qui s'est manifesté par un risque composite « vague de chaleur et îlot de chaleur urbain (ICU) ». L'intensité des ICU dépend de la météorologie, des surfaces et des formes urbanisées, des émissions d'origine humaine (activités transport, industrielles, chauffage), de l'heure, de la journée, de la saison, etc. La présence de végétal tempère les effets d'ICU et peut contribuer à une meilleure efficacité énergétique des bâtiments. La localisation des ICUs permet aux gestionnaires des villes d'aménager les zones urbaines les plus sensibles à ce phénomène avec des îlots de fraîcheur définis par une zone végétale, dont l'action rafraîchissante permet d'éviter ou de contrer directement ou indirectement les effets des îlots de chaleur. Ainsi, la présence de végétation contribue, par l'ombrage et/ou l'évapotranspiration, à rafraîchir l'air.

L'ombre des arbres évite que la surface du sol ne chauffe trop et procure une sensation de fraîcheur au promeneur. L'évapotranspiration se produit naturellement lors de la photosynthèse par 1) la transpiration des plantes qui, après avoir absorbé l'eau du sol pour en capter les éléments nutritifs, en relâchent une partie par leurs feuilles et 2) l'évaporation de l'eau contenue dans le sol. Afin de s'évaporer, cette eau absorbe la chaleur de l'air ambiant,

causant ainsi un refroidissement localisé. Grâce à l'évapotranspiration, un arbre mature peut perdre jusqu'à 450 litres d'eau par jour et engendrer un rafraîchissement important, équivalent à cinq climatiseurs fonctionnant pendant 20 heures (Liébard et al., 2005). La présence d'arbres autour d'un bâtiment augmente la rugosité générale de la surface, réduisant d'une manière générale la vitesse du vent et sa force de pénétration. Cet effet réduit les entrées d'air chaud dans les bâtiments en été et d'air froid en hiver et permet une efficacité énergétique accrue. Néanmoins, en situation caniculaire avec faible vent cette ventilation diminuée peut être problématique.

• Drainage des eaux de pluie

Les espaces végétalisés jouent un rôle important dans la gestion des eaux de pluie. L'imperméabilisation des sols en ville limite fortement l'infiltration des eaux de pluie, l'eau ruisselle immédiatement et rejoint les écoulements superficiels aboutissant via les infrastructures dans les systèmes d'épuration et dans la nature. Or les eaux de ruissellement se chargent de matières en suspension (mégots, plastiques, déchets en tous genres) et de polluants (hydrocarbures) sur leur parcours. De plus, les volumes d'écoulements lors de fortes pluies peuvent provoquer des inondations par difficultés d'écoulement ou remontée d'eau. Les espaces de végétation, les toitures végétalisées, les bois urbains, etc., représentent des surfaces perméables, favorisant l'infiltration de ces eaux pluviales, leur rétention et le ralentissement des écoulements.

• Séquestration du carbone

La photosynthèse des végétaux se caractérise par l'absorption du gaz carbonique et la production d'oxygène, elle est essentielle à la vie sur Terre. La séquestration de carbone par la végétation urbaine est importante pour les politiques environnementales locales. Elle est influencée par le taux de croissance, la mortalité, l'espèce et l'âge des arbres. D'une manière générale, la séquestration augmente avec la croissance de l'arbre jusqu'à ce que ce dernier arrive à maturité. À partir de ce stade et pendant toute la phase de sénescence, l'arbre commence à émettre des quantités de carbone. En 2015, une étude sur Montpellier a ainsi estimé à 14 967 tonnes de carbone/an séquestrés par les arbres urbains, soit 11,33kg/an/m² (Bao, 2021). Cette séquestration diffère selon les espèces, à Montpellier le Sophora, le Frêne et le Platane sont les 3 essences dominantes.

Végétation et pollution

La végétation permet également de réduire la pollution de l'air, de l'eau ainsi que la pollution sonore.

• Filtration de l'air

La qualité de l'air est une préoccupation majeure en milieu urbain. De nombreux polluants sont concernés (SO_x, NO_x, CO_x, particules fines). Plusieurs travaux montrent que la végétation filtre les particules atmosphériques (dont les PM_{2,5}) et absorbe les polluants (en particulier NO₂ et SO₂). À Montpellier entre janvier et décembre 2015, les arbres ont éliminé environ 498,89 t. de polluants (soit 108,7 t. de NO₂, 378,4 t. de O₃ et 11,8 t. de PM_{2,5}) (Bao, 2021). Néanmoins, certaines particularités de fonctionnement peuvent s'avérer dommageables pour le citoyen. En effet la végétation participe à la formation de l'ozone troposphérique en émettant certains composés organiques volatils (COV), or l'ozone est un polluant nocif pour la santé humaine, responsable notamment de pics de pollution estivaux en ville. De plus la végétation, plus particulièrement le pollen de certaines espèces, peut être source d'allergènes, affectant les voies respiratoires notamment.

• Traitement des eaux usées

Les zones humides, naturelles ou artificielles en milieu urbain permettent de faciliter les écoulements naturels, de proposer des zones de fraîcheur et d'épurer les eaux usées (phytoremédiation).

• Réduction du bruit

Les surfaces végétales et non recouvertes permettent de réduire le niveau de bruit lié à la circulation notamment le long des réseaux routiers.

Augmentation et maintien de la biodiversité

En ville la végétation se développe sous contraintes, en alignement le long des réseaux, dans les parcs et jardins ou dans des zones délaissées en friches.

• Parc / Arbre d'alignement

Le réseau d'espace vert urbain est composé d'espaces publics (végétation implantée dans les rues, parcs publics...) et d'espaces privés (jardins résidentiels, terrains de golf...). Dans ces divers types d'espace, la végétation est soumise à diverses pratiques (tailles, arrosage...) selon les ressources disponibles (temps, finance) et la mobilisation des bonnes pratiques de gestion. Ces différences influent sur la structure, la composition et la distribution des communautés d'espèces végétales et animales dans le paysage urbain. La végétation constitue un support et relai incontournable d'une partie de la biodiversité en ville tout en contribuant à améliorer le cadre de vie des citoyens. Elle participe à la trame verte urbaine en constituant des corridors pour une quantité d'espèces et joue un rôle clé dans le développement durable des villes (Grenelle de l'Environnement, 2007 ; ONU, WUP 2018 ; ANR VegDUD, 2007-2014).

Dans un contexte de changement climatique, la fréquence et l'intensité des sécheresses devraient augmenter, les arbres de rue pourraient ainsi être exposés à un risque croissant de mortalité lié au stress hydrique, exacerbé par les vagues de chaleur en ville (David et

al., 2017) en plus des vecteurs de stress urbains plus traditionnels caractéristiques de ce milieu (air plus sec, polluants atmosphériques, maladies, sols moins riches et tassés, manque d'espace pour les racines...). De plus, certaines espèces d'arbres en ville représentent un biotope fragile soumis à des pressions anthropiques et climatiques croissantes (Grimm et al., 2008), alors que d'autres espèces invasives prolifèrent mieux dans ces conditions. Par ailleurs, l'espérance de vie des arbres en ville est réduite par rapport à ceux situés en milieux ruraux (Mullaney et al., 2015). Pour ces raisons, le suivi de l'état sanitaire des arbres est une action stratégique pour la protection des espaces verts en ville, et la prévention, afin de mettre en place des politiques environnementales adéquates (Nowak, 2018).

Pour remédier à la perte de biodiversité, construire des villes durables et limiter l'artificialisation des espaces naturels de leur territoire, les villes sont en demande d'outils pour évaluer la biodiversité à différentes échelles. La cartographie des espèces et notamment celle des essences arborées est un des outils disponibles d'aide à la décision (OAD) pour gestionnaires (Li, 2019). De nos jours, cette cartographie est encore souvent effectuée manuellement, via une campagne terrain ou par photo-interprétation, en utilisant Google Earth, la BD ORTHO® (orthophotographies aériennes) ou des données issues des SIG (Système d'Information Géographique).

La ville de Toulouse aurait par exemple environ 140 000 arbres répartis sur plus de 100 km² selon les estimations des services espaces verts. Une procédure de relevé est fastidieuse, limitée à des zones réduites et ne permet pas d'assurer un suivi régulier. Le recours à des moyens de télédétection dans le domaine optique (0,4-2,5 μm) a déjà montré beaucoup d'avantages pour accroître la spatialisation et la répétitivité de l'étude du suivi sanitaire des arbres en villes avec parfois des échelles spatiales très fines.

Une autre étape nécessaire est d'avoir accès à une cartographie des espèces (Fassnacht, 2016 ; Nabucet, 2018 ; Feng et al., 2015) et à l'emprise des arbres (Chen et al., 2006). L'exploitation de la richesse spectrale d'un capteur satellite permet d'obtenir des informations sur les pigments, le contenu en eau, ou la matière sèche et sur le suivi du cycle phénologique (suivi de ses différents stades de développement) de la végétation. Un capteur optique couplé éventuellement à des informations structurales issues de données Lidar (scanner laser aéroporté) peut informer de l'état de santé de la végétation arborée (Degerickx et al., 2018 ; Shi et al., 2018). L'utilisation de nouvelles données issues d'instruments à haute résolution spatiale (décamétrique au moins) et à forte revisite (quelques jours comme Sentinel-2 ou Venüs) permet en plus de suivre les processus saisonniers (dits phénologiques) des espèces d'arbres durant l'année. L'hypothèse communément retenue est que des arbres sains sont supposés avoir une phénologie quasi identique d'une année à l'autre si les conditions climatiques sont idéalement les mêmes.

Une rupture inattendue au cours de cette phénologie peut être interprétée comme un précurseur d'un stress (Granero-Belinchon et al., 2020). Ces anomalies peuvent se manifester par des changements dans les dates de début et de fin des différentes phases, en majorité caractérisées par le débourrement, la floraison, la maturation des fruits et la sénescence (Differt, 2001). La détection de ces anomalies phénologiques reste cependant dépendante du nombre d'acquisitions satellitaires durant l'année (Granero-Belinchon et al., 2021).

• **Friches urbaines**

Les friches urbaines, espaces bâtis ou non, anciennement utilisées pour des activités industrielles, commerciales ou autres et abandonnées, font partie intégrante du processus de renouvellement des villes. Elles nuisent parfois au paysage urbain et peuvent engendrer un risque en matière de sécurité (effondrement du bâti, pollution des sols, squats...). Cependant, elles présentent un atout dans le sens où elles constituent des espaces de respiration et de régulation climatique au cœur des villes et offrent un potentiel d'espace foncier disponible. Ces derniers constituent de nouveaux milieux et des espaces de spontanéité pour le développement de la biodiversité, qui peuvent jouer un rôle d'espaces refuges pour les espèces.

Cependant, les bases de données les recensant sont rares et les deux principalement exploitées sont : BASOL et BASIA (BRGM). BASOL identifie à l'échelle nationale les sites et sols pollués ou potentiellement pollués appelant une action des pouvoirs publics, à titre préventif ou curatif. BASIA, recense à l'échelle de chaque département, les sites industriels abandonnés ou non, susceptibles d'engendrer une pollution de l'environnement. Ces bases ne sont donc pas exhaustives. Il est alors d'intérêt de localiser les friches urbaines et d'actualiser leur mise à jour régulière. La télédétection optique offre un moyen de détection de ces zones avec une fréquence temporelle régulière.

Une fois ces zones localisées, leur caractérisation est primordiale afin d'assurer une réhabilitation réussie. Également, comme le soulignent Rankovic et al. (2012) la végétation peut aussi entraîner un certain nombre de coûts, désagréments ou gênes. Escobedo et al. (2011) en résume les principaux éléments (figure 5.7). **La volonté des collectivités territoriales de planter des arbres, de créer des forêts urbaines, de laisser des friches se développer ne doit pas s'affranchir d'une réflexion sur les contraintes associées à ces implantations et celles subies par la végétation en milieu urbain.**

Coûts	Services écosystémiques
Financiers <i>(usage des sols, travail, capital)</i>	<ul style="list-style-type: none"> Élagage, plantation, remplacement, retrait, transplantations, contrôle des maladies, irrigation Dompage de la végétation aux infrastructures urbaines : litiges, habitations et propriété, câbles, trottoirs, routes Modification des opportunités d'usages des sols alternatives Lumière solaire bloquée – augmentation des dépenses énergétiques Déchets verts – débris, arbres tombés, branches, litière Domages humains liés aux maladies, aux morsures d'insectes ou autres animaux sauvages, allergies
Nuisances sociales	<ul style="list-style-type: none"> Pollen allergénique Réservoir pour des maladies vectorielles : maladie de Lyme, Virus du Nil occidental, dengue, rage Attraction d'animaux sauvages – dommages aux structures et plantes ornementales, déjections, attaques sur animaux domestiques, nuisances aux humains, morsures d'animaux sauvages Vue obstruée, baisse d'esthétique Problèmes de sécurité liés aux chutes d'arbres Sentiment d'insécurité selon les espaces et les heures de la journée
Environnementaux	<ul style="list-style-type: none"> Quantité et qualité de l'eau – afflux de fertilisants et de pesticides Apports de fertilisants – perturbation des cycles des nutriments Accroissement des dépenses énergétiques à cause de l'entretien Pollution de l'air liée à l'entretien : émission de dioxyde de carbone et de méthane à cause de la décomposition, polluants atmosphériques Émission de composés organiques volatils et d'aérosols secondaires Retrait d'espèces natives et Introduction d'espèces invasives

Figure 5.7. Typologie des services écosystémiques urbains et types de coûts associés. (Source : Escobedo et al., 2011).



5. Modélisation des inondations urbaines

Carole DELENNE (UM - HSM), Gwladys TOULEMONDE (UM - INRIA Lemon)

Les journaux télévisés, les vidéos en ligne et les réseaux sociaux nous ont, depuis de nombreuses années, habitués aux images d'inondations catastrophiques, en particulier dans les zones habitées (**voir chapitre-enjeu Santé**). En Occitanie, les processus pluvieux peuvent être intenses et très localisés notamment pendant l'automne. Des masses d'air humide provenant de la Méditerranée, dont l'eau est encore chaude, provoquent ces pluies en se déplaçant vers les contreforts de la chaîne de montagnes des Cévennes. On parle alors d'événements « Cévenols ». L'urbanisation croissante des agglomérations s'accompagne de l'imperméabilisation des surfaces. Les pluies intenses qui pourraient s'infiltrer dans des sols naturels sont alors transférées dans les réseaux de collecte et les bassins de rétention qui peuvent déborder localement et de façon très rapide. La prise de conscience des responsables politiques s'est notamment traduite par l'adoption, au niveau Européen, de la Directive Cadre Inondation, dont une des dispositions fait obligation aux collectivités de disposer de cartes de risque d'inondation à jour sur leur territoire.

Les nombreux acteurs impliqués dans la gestion du risque d'inondation (collectivités locales, services de secours et de protection civile, assureurs...) sont demandeurs de solutions qui leur permettraient de le gérer plus efficacement. Avant et après la crise, il est nécessaire de mettre en place des mesures de prévention et de mitigation des risques (aménagement de zones de rétention, définition des périmètres d'inondabilité...). Pendant la crise, il faut pouvoir gérer les communications, l'organisation des secours, la protection des zones sensibles. Pour cela, l'idéal serait de prévoir en temps réel comment l'événement pluvieux va se comporter dans les minutes suivantes et comment l'eau va s'écouler dans la ville.

Les bureaux d'études disposent d'outils de modélisation qui utilisent une représentation de l'espace appelée « maillage ». Chaque rue, immeuble, rond-point... est représenté en utilisant un certain nombre de mailles. Un logiciel hydraulique calcule alors les hauteurs d'eau et les vitesses dans chacune de ces mailles, à des intervalles de temps très courts à partir de l'information de la pluie.

Cependant, plusieurs difficultés empêchent encore la prévision efficace et rapide des inondations. **En Occitanie, les pluies intenses et extrêmement variables à la fois dans l'espace et le temps sont difficiles à mesurer et le maillage fin du logiciel hydraulique est très long à mettre en place et implique des temps de calcul prohibitifs (parfois beaucoup plus long que le temps réel).**

Pour pallier le manque de données mesurées, des scénarios de pluies réalistes sont déterminés grâce à des modèles de simulation (stochastiques) spécifiques. Ceux-ci permettent de représenter l'évolution dans le temps et l'espace d'une pluie « possible », ce qui est particulièrement intéressant pour simuler des événements extrêmes, par définition peu souvent mesurés et qui restent encore difficiles à définir et quantifier. Concernant la nécessité d'accélérer les calculs, de nouveaux modèles hydrauliques ont récemment été développés pour permettre de s'affranchir de l'étape de maillage précis de la zone d'intérêt. Ceux-ci utilisent des mailles plus grandes que la largeur des rues tout en gardant l'information de la « place disponible » à l'eau pour s'écouler (une sorte de « porosité » de la maille). Les résultats, un peu moins précis, sont obtenus jusqu'à 1000 fois plus vite qu'avec les modèles classiques (Guinot, 2012 ; Guinot et al., 2018). Les modèles stochastiques ou physiques utilisés jusqu'ici sont également rejoints depuis peu par l'intelligence artificielle dans l'objectif d'accélérer encore les temps de calcul et d'améliorer la précision des modèles à grandes mailles (figure 5.8).

Quels que soient les modèles utilisés, ils nécessitent des données difficiles à estimer (pluie, topographie précise, carte d'occupation du sol pour identifier les zones d'infiltration ou de ruissellement...) ; il est donc primordial de prendre en compte la propagation des incertitudes liées à ces données dans les résultats des modèles. Les acteurs de la gestion du risque inondation et le grand public, qui souhaitent des informations claires et tranchées **doivent aussi être sensibilisés à la difficulté que présente l'étude précise de ce risque.**

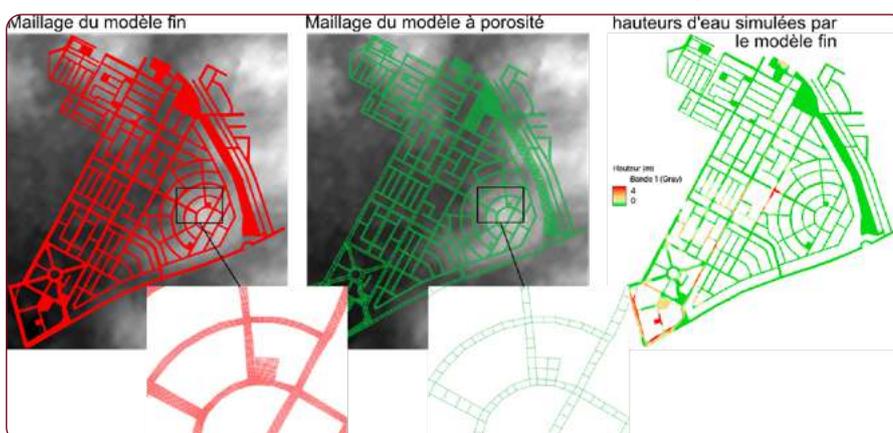


Figure 5.8. Comparaison d'un modèle classique et à grandes mailles en milieu urbain pour une pluie de 4h. Les durées de calcul sont de 4h environ pour le modèle fin et 2min pour le modèle « à porosité ». Bien que moins précis, les résultats du modèle à porosité sont du même ordre de grandeur (Source : modèles développés par des chercheurs des laboratoires HSM et IMAG, membres de l'équipe Inria Lemon)

6. Impact du changement climatique sur les dommages dus au retrait-gonflement des argiles

Sébastien GOURDIER (BRGM)

Le phénomène de retrait-gonflement des argiles (RGA) engendre chaque année des dégâts considérables, indemnisables au titre des catastrophes naturelles. La grande majorité des sinistres concerne les maisons individuelles. En France métropolitaine, ce phénomène, mis en évidence à l'occasion de la sécheresse exceptionnelle de l'été 1976, a pris une réelle ampleur lors des périodes sèches des années 1989-91 et 1996-97, lors de la sécheresse exceptionnelle de l'été 2003 puis, dernièrement, lors des étés 2018 et 2019. Il génère en outre un fort impact financier pour la collectivité : la Caisse Centrale de Réassurance (CCR) estime le coût total des sinistres liés au RGA pour la période 1989-2019 à 13,5 milliards d'euros.

Plus de 11 500 communes ont été reconnues au moins une fois en état de catastrophe naturelle pour la sécheresse, soit près du tiers des communes françaises, et près de 33 000 arrêtés ont été pris depuis 1989. **La région Occitanie cumule à elle seule 27 % du coût national des dommages liés au RGA (CCR, 2015) et près de 43 % des communes de la région ont été touchées au moins une fois par le phénomène.** La carte d'exposition publiée en 2019 sur le portail Géorisques indique que le territoire régional est couvert à 68 % par des sols argileux plus ou moins sensibles aux variations de teneurs en eau : 31 % du territoire présente un niveau d'exposition fort au RGA, 28 % un niveau moyen et 9 % un niveau faible (figure 5.9).

Les projections climatiques prévoient une augmentation de l'intensité et de la fréquence des épisodes de sécheresse, à différents degrés selon les scénarios d'émission de gaz à effet de serre envisagés. À la fin du siècle, on pourrait connaître des sécheresses comparables à celle de 2003 trois à quatre fois par décennie et ces sécheresses pourraient atteindre des zones jusque-là épargnées, telles que les zones montagneuses.

Le BRGM a développé un modèle de coûts des dommages liés au RGA basé sur les projections climatiques du GIEC et les perspectives démographiques à l'horizon 2070 (MEDDE, 2012). Ce modèle permet d'évaluer l'impact du changement climatique sur la sinistralité. Ainsi, le coût total de la sinistralité liée au RGA, calculé par le modèle entre 2021 et 2050 suivant un scénario de référence ne tenant pas compte du changement climatique, est de l'ordre de 3,0 Mds €, soit un coût annuel moyen de 100 m€, à comparer au coût annuel moyen de 88 m€ enregistré entre 1990 et 2013 (Gourdiér et Plat, 2018). La différence est expliquée par l'augmentation du parc immobilier en lien avec l'augmentation de la population. En intégrant le changement climatique dans le calcul, **le coût total est estimé entre 7,0 Mds € et 8,8 Mds €, soit un coût environ 2,6 fois supérieur à celui estimé suivant le scénario de référence (FFA, 2015).** Pour réduire ce risque qui va croître dans les années à venir et s'adapter au changement climatique, il apparaît donc nécessaire de modifier nos pratiques constructives.

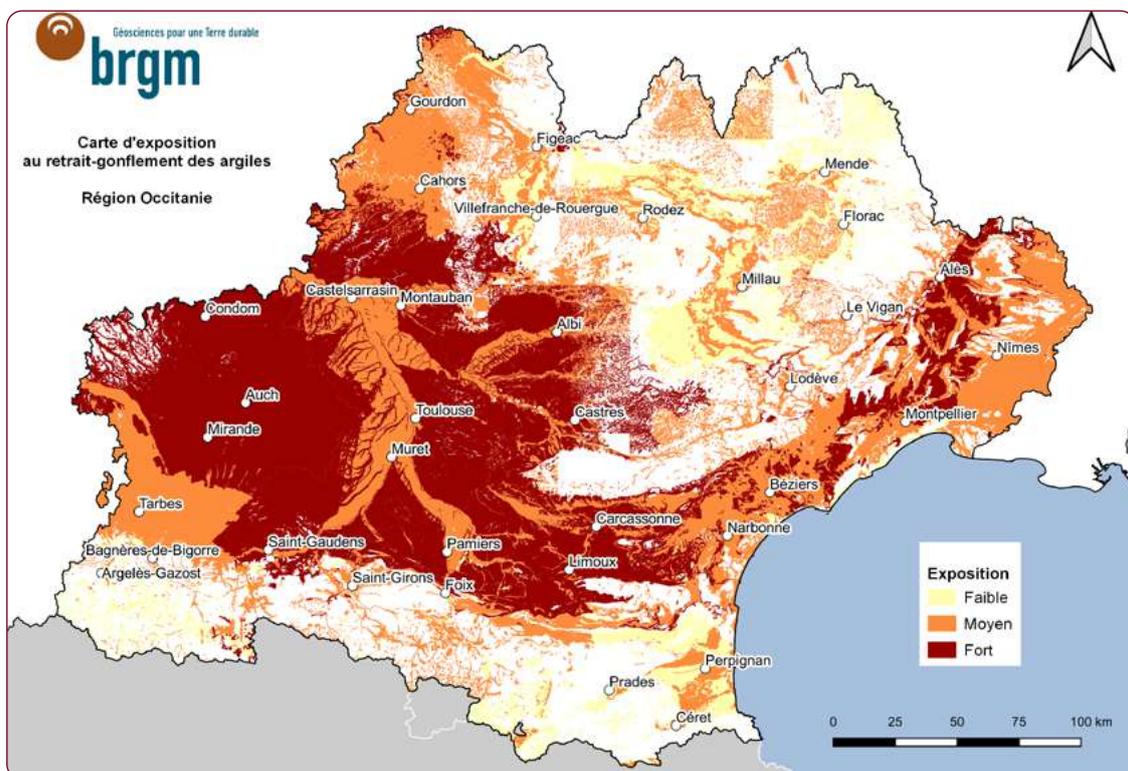


Figure 5.9. Carte d'exposition au retrait-gonflement des argiles à l'échelle régionale. (Source : BRGM pour le CROCC_2021)

7. L'Occitanie, une région touchée par les sinistres climatiques

Guillaume SIMONET (RECO - LISST)

Un indice de sinistralité en évolution

Les données collectées par les assureurs, qu'elles concernent l'assurance agricole, des habitations ou des entreprises, permettent de bien illustrer l'ampleur des impacts climatiques. Sur la période 1999-2018 et à l'échelle internationale, la France est le 15^e pays le plus touché par les événements climatiques, mais le premier parmi les économies avancées (Ekstein et al., 2019).

D'une moyenne d'un milliard d'euros par an dans les années 1980, le coût des événements climatiques est passé à une moyenne proche de 3 milliards d'euros par an au cours des dix dernières années et la Fédération française de l'assurance (FFA) anticipe un quasi-doublement des sinistres climatiques pour les 25 prochaines années, quantifiant à 35 % la part due aux changements climatiques (FFA, 2015).

Néanmoins, la localisation des sinistres climatiques est inégale sur le territoire national puisque les sinistres climatiques survenus en France entre 1989 et 2018 ont principalement été localisés dans quatre départements, dont trois situés en Occitanie (le Tarn-et-Garonne, l'Aude et le Tarn), le Lot-et-Garonne étant le 4^e concerné, lesquels enregistrent depuis trente ans le plus d'inondations, de tempêtes et de sinistres sécheresse en métropole (figure 5.10).

À titre d'exemple et selon l'indice de sinistralité (encadré 5.A), le Tarn-et-Garonne se classe en première position des départements métropolitains en termes de fréquence de sinistres sécheresse et de sinistres tempête, et en 26^e position pour les inondations, tandis que le Gers, pour la sécheresse, et le Gard, pour les inondations, font également partie des départements les plus fréquemment affectés sur le territoire national (Chneiweiss et Bardaji, 2020).

Une corrélation étroite s'observe d'ailleurs entre la répartition des zones sinistrées et la présence à faible profondeur dans les sols de formations argileuses, qui présentent de fortes variations de volume en cas de modification de la teneur en eau (voir contribution 6 sur les sols argileux).

La garantie CatNat (catastrophe naturelle) et TGN (tempête, grêle, neige)

La garantie « CatNat » permet d'indemniser les dégâts causés par une catastrophe naturelle uniquement si un arrêté interministériel paru au Journal officiel constate l'état de catastrophe naturelle pour l'aléa concerné dans la zone où se trouvent les biens sinistrés et si ces biens sont garantis en assurance de dommages.

La répartition départementale des arrêtés CatNat est particulièrement concentrée selon les risques et pour la sécheresse, c'est la Haute-Garonne qui arrive en tête (figure 5.11). Pour rapporter la sinistralité, un indicateur économique usuel dans le monde assurantiel consiste à rapporter le montant des sinistres au montant des primes, dit rapport S/P. Calculé au niveau départemental, ce rapport signale ainsi une redistribution massive de la très grande majorité des départements métropolitains vers plusieurs d'Occitanie tels que l'Aude (S/P = 318 %), le Gard (306 %), l'Hérault (271 %) ou encore les Hautes-Pyrénées (188 %) (figure 5.12 ; Chneiweiss et Bardaji, 2020).

Le vent et la grêle ne sont pas des périls couverts par le régime CatNat, à l'exception, depuis 2001, des « effets du vent dû à un événement cyclonique pour lequel les vents maximaux de surface enregistrés ou estimés sur la zone sinistrée ont atteint ou dépassé 145 km/h en moyenne sur dix minutes ou 215 km/h en rafales ». Au vu de la concentration de la sinistralité, la connaissance de ces territoires à risque pourrait permettre d'adapter plus finement le niveau de la prime en fonction du département ou de la région.

Toutefois, les entreprises d'assurance sont toujours dans une logique de mutualisation, si bien que les territoires les plus exposés ne sont pas pénalisés par des primes significativement plus élevées. En effet, le ratio S/P signale une redistribution nette de la grande majorité des départements métropolitains là encore vers plusieurs d'Occitanie tels que le Tarn-et-Garonne (311 %), les Hautes-Pyrénées (220 %) ou le Gers (180 %) (Chneiweiss et Bardaji, 2020).



Crédit photo : Pixabay.com

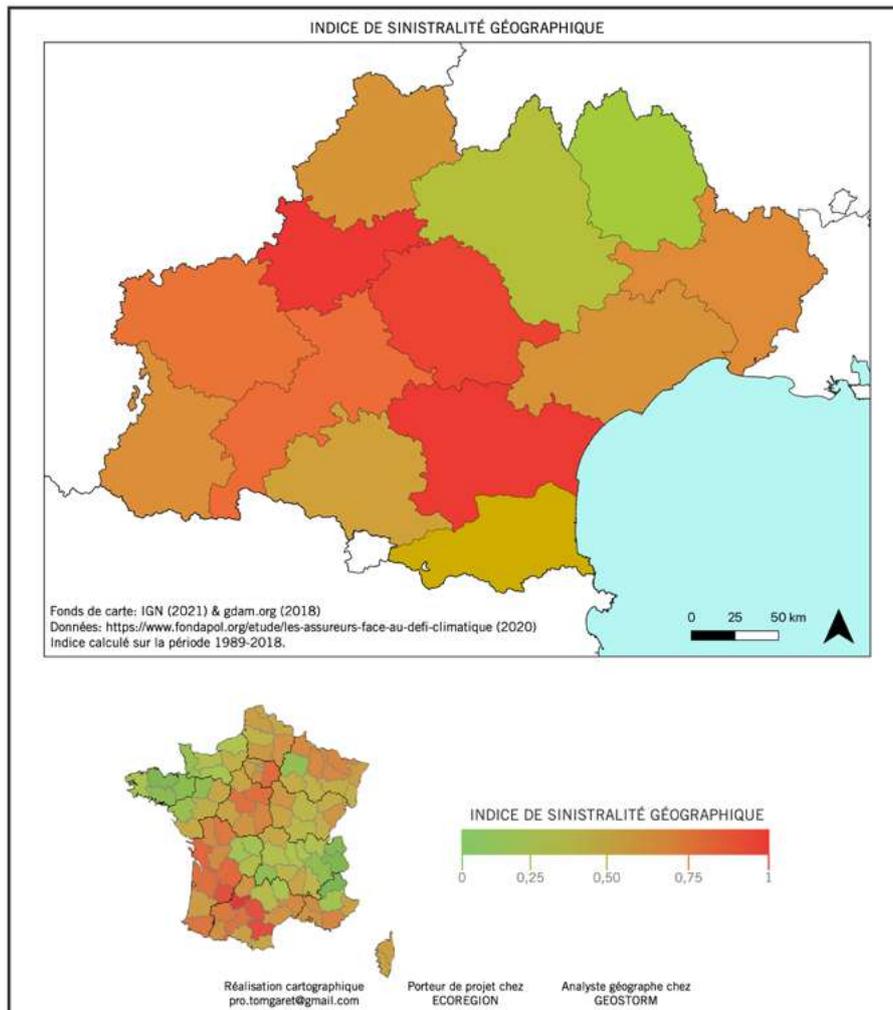


Figure 5.10. Indice de sinistralité géographique en France métropolitaine et en Occitanie. (Source : Chneiweiss et Bardaji, 2020 - données Fédération française de l'assurance (FFA). Cartographie élaborée par Tom Garet pour le CROCC_2021).

Encadré 5.A. L'indice de sinistralité

L'indice de sinistralité (rapport entre nombre de sinistres et matière assurée) permet une visualisation géographique des départements les plus sinistrés par un événement climatique. Cet indice cumule les rangs des trois principaux sinistres climatiques : les inondations, les tempêtes (et la grêle) et la sécheresse. Pour chaque catégorie de sinistres, une pseudo-fréquence est ainsi calculée au niveau départemental sur la période 1989-2018. Pour les inondations et les tempêtes, il s'agit du ratio entre nombre de sinistres et nombre de contrats et pour la sécheresse, de la proportion des communes sinistrées. Comme ces indicateurs ne sont pas homogènes entre eux, une transformation préalable est nécessaire avant sommation. Chaque département est classé de 1, pour le moins sinistré, à 95, pour le plus sinistré. L'indicateur somme les trois classements puis est normalisé entre 0 et 1. Il est à noter que l'indicateur ne tient pas compte du coût de la sinistralité, ce qui constitue une de ses limites. Un sinistre sécheresse ou inondation a, en moyenne, un coût environ quatre fois supérieur à celui d'une tempête (ou d'un épisode de grêle). Également, il n'y a pas toujours correspondance entre la survenance d'un événement naturel et le niveau de sinistralité tel que relevé par les assureurs. C'est évidemment fonction du taux d'assurance mais également de la qualité du bâti. Certaines régions de France comme la Bretagne sont relativement préservées alors qu'elles sont exposées aux tempêtes, signe que le bâti y est particulièrement adapté. Enfin, rappelons que l'exposition inégale des territoires aux événements climatiques est analysée sur une période longue de trente ans, période courte pour une analyse climatologique. Elle exclut ainsi des événements « attendus » non survenus (p. ex. crue de type de celle de 1910 à Paris) mais inclut des événements qualifiés de millénaires (tempêtes Lothar et Martin de 1999). De ce fait, un territoire épargné sur la période étudiée pourrait très bien être exposé dans le futur à la survenance d'événements climatiques extrêmes (Chneiweiss et Bardaji, 2020).

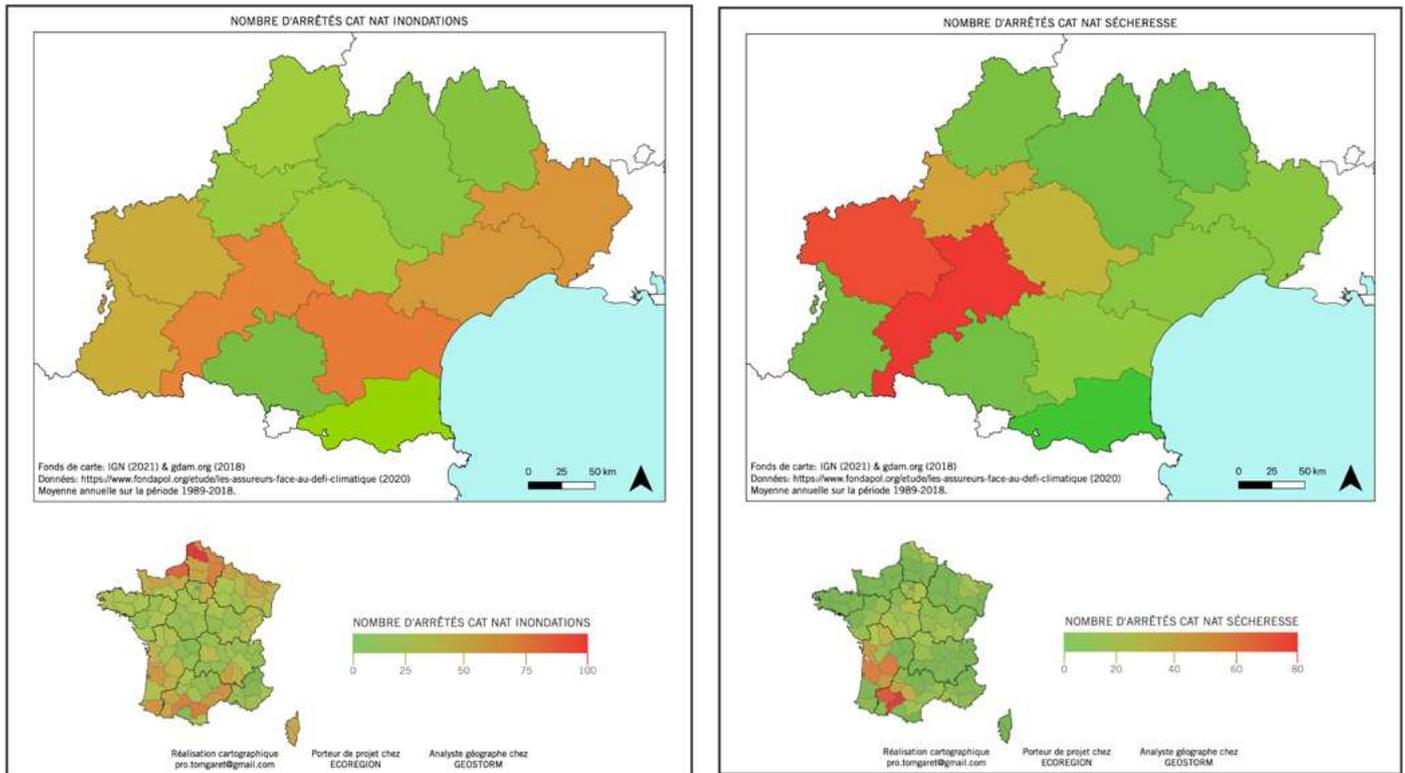


Figure 5.11. Nombre annuel moyen d'arrêtés CatNat (1989 – 2018) pour les inondations et la sécheresse en France métropolitaine et en Occitanie.
 (Source : Chneiweiss et Bardaji, 2020 - données Caisse centrale de réassurance (CCR) et FFA. Cartographie réalisée par Tom Garet pour le CROCC_2021)

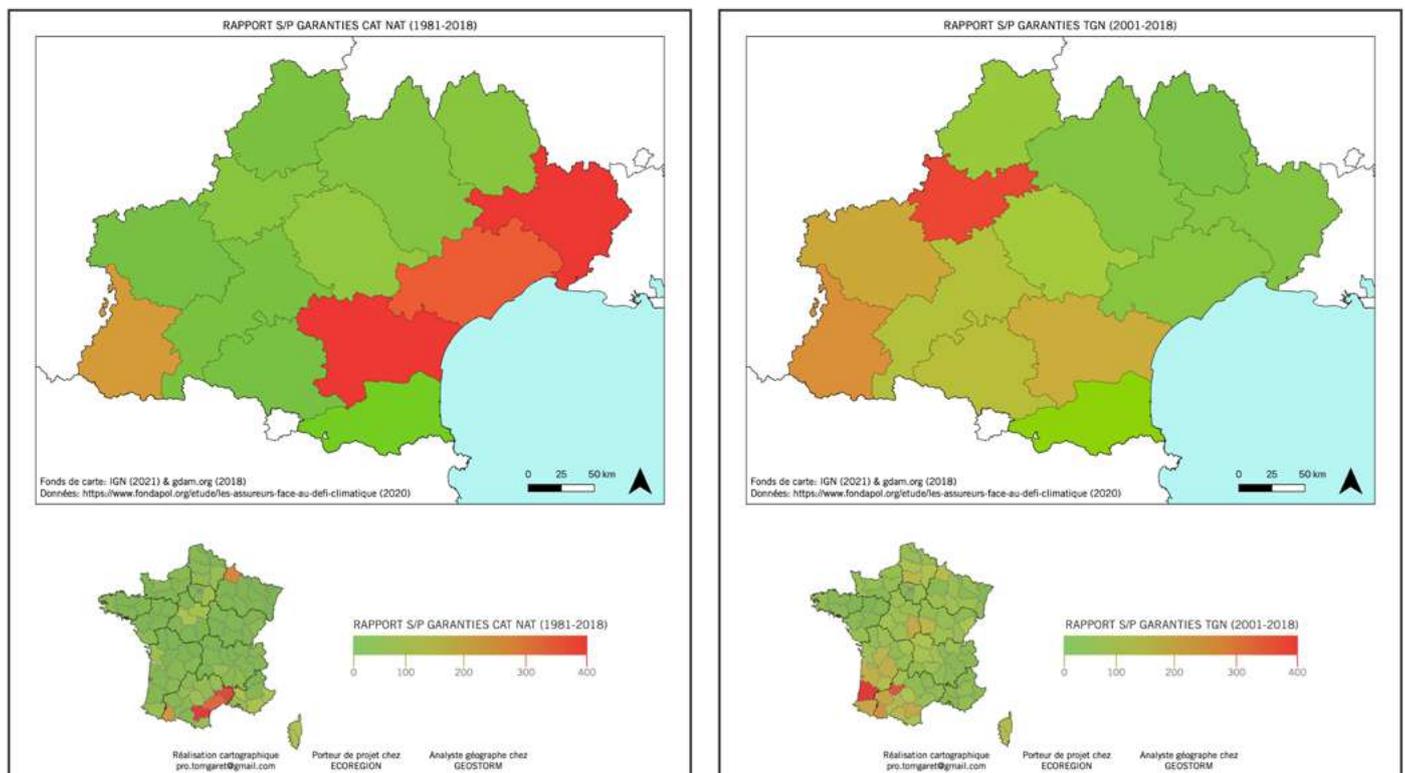


Figure 5.12. Rapport S/P – Garantie CatNat (1989 – 2018) et TGN (2001 – 2018) en France métropolitaine et en Occitanie.

Grille de lecture : un rapport S/P d'environ 70 % correspond à une prime en adéquation à la sinistralité. Les départements en rouge sont des départements où le montant de la prime ne reflète pas la sinistralité. À l'inverse, les départements en vert clair ont des niveaux de prime excessifs par rapport à la sinistralité.

(Source : Chneiweiss et Bardaji, 2020 - données CCR, FFA. Cartographie réalisée par Tom Garet pour le CROCC_2021)

8. L'intégration des enjeux d'adaptation dans l'urbanisme

Geneviève BRETAGNE (AUAT - LISST), Sinda HAOUES-JOUVE (UT2J - LISST)

On observe depuis une dizaine d'années une montée en puissance de la problématique de l'adaptation au changement climatique dans le champ de la planification et de l'aménagement urbains. Cependant, bien que régulièrement confortée par l'évolution de la législation, et en dépit de pratiques urbanistiques riches et plurielles, l'articulation entre urbanisme et adaptation demeure discrète en comparaison avec les enjeux d'atténuation qui semblent s'enraciner plus aisément dans les politiques urbaines. Pourtant, **plusieurs projets de recherche impliquant des praticiens de l'urbanisme ont été menés ces dernières années en Occitanie sur l'adaptation.** Prenant souvent comme terrain d'étude l'agglomération toulousaine, ils se sont focalisés pour la plupart sur l'enjeu du confort thermique des espaces urbains, en lien avec le microclimat urbain dans une perspective de changement climatique. **La collaboration entre chercheurs et praticiens y a pris des formes très diverses et a impacté de manière variable la pratique urbanistique.**

Planification urbaine

Sur le volet de la planification urbaine, le projet MAPUCE (Modélisation appliquée au droit de l'urbanisme : climat urbain et énergie, ANR, 2014-2018) a contribué à cet effort de deux manières : d'une part en développant une méthodologie générique de production de données et d'outils directement exploitables par les urbanistes, et d'autre part en accompagnant les praticiens dans l'effort d'intégration des enjeux climatiques dans le premier PLUi-H de Toulouse Métropole (2015-2019). Ce second volet qui a nécessité une collaboration étroite avec les services de la collectivité et avec l'Agence d'urbanisme de Toulouse (AUAT), a notamment permis d'enrichir le diagnostic territorial par des cartographies nouvelles (**figure 5.13**) permettant de lire le territoire à l'aune de ses caractéristiques et des enjeux climatiques. Ces cartes montrent les expositions différenciées du territoire et offrent des prises pour améliorer le confort thermique, constituant ainsi de réels outils d'aide à la décision qu'il serait possible de répliquer dans d'autres collectivités de la région. Un travail similaire est d'ailleurs en cours à Montpellier dans le cadre d'une thèse menée au laboratoire Lifam de l'Ecole nationale supérieure d'architecture de Montpellier, portant sur l'évaluation de l'impact des politiques de planification urbaine sur l'intensification et l'augmentation des îlots de chaleur urbain dans la métropole montpellieraine.

Dans le prolongement de MAPUCE, le projet PÆNDORA (Planification, adaptation, énergie : données territoriales et accompagnement, ADEME, 2017-2020) a visé la finalisation des outils de visualisation, d'extraction et d'exploitation des données urbaines et climatiques, couvrant toute la France, en accès libre et descendant à l'échelle de l'îlot urbain, afin qu'ils soient opérationnels pour les

urbanistes. Ce projet s'est également attaché à améliorer les méthodologies d'accompagnement des praticiens dans l'élaboration de documents de planification « climatisés », en les adaptant aux modes de faire des urbanistes. Ce travail a été capitalisé sous la forme d'un guide méthodologique édité par l'ADEME et consacré à l'adaptation dans le champ de l'urbanisme.

Aménagement urbain

Sur le volet aménagement urbain, le projet IFU (IFU : Ilots de fraîcheur urbains, ADEME, 2013-2015) a visé à accompagner Toulouse métropole et Oppidéa dans l'effort de limitation des risques de surchauffe urbaine dans le cadre du projet de la ZAC Montaudran Aérospatial. Des ateliers de sensibilisation aux leviers d'action opérationnels d'atténuation des ICU ont été organisés, puis des scénarios d'aménagement ont été co-construits et simulés du point de vue de l'impact sur le confort climatique des espaces extérieurs. Ce travail de sensibilisation a été poursuivi et élargi à d'autres thématiques dans le cadre du projet CapaCités (des Connaissances aux Actions pour l'Adaptation des Cités, ADEME, 2014 – 2017) dans lequel les praticiens concernés étaient cette fois des architectes et des urbanistes privés, notamment du réseau professionnel l'APUMP (Association des professionnels de l'urbanisme Midi-Pyrénées).

La coopération entre chercheurs et praticiens mise en œuvre au sein de tous ces projets témoigne incontestablement d'une montée en compétence climatique des acteurs de l'urbanisme, en particulier sur la question de l'adaptation. Par exemple, les praticiens de Toulouse Métropole et de l'AUAT ont capitalisé l'expertise acquise à travers plusieurs productions, notamment un guide de recommandations techniques à destination des services de la Métropole et des aménageurs/promoteurs, et un atlas cartographique climatique à l'échelle du territoire métropolitain et de chacune de ses communes. Cette collaboration révèle en outre le rôle des acteurs relais, notamment les agences d'urbanisme qui jouent souvent le rôle de passeurs entre les scientifiques et les praticiens des collectivités locales.

Elle pose néanmoins la question de l'accès et surtout de l'appropriation des données et des outils climatiques par les praticiens. **Les conditions d'un meilleur portage politique et de la diffusion de l'expertise acquise au-delà du premier cercle des personnes et/ou services impliqués dans les collaborations, restent elles aussi cruciales à explorer.** La transversalité et la complexité du sujet font ressortir un besoin de développer d'autres savoirs et savoir-faire qualitatifs, pour partager plus largement un vocabulaire et un dessein communs en matière d'adaptation.

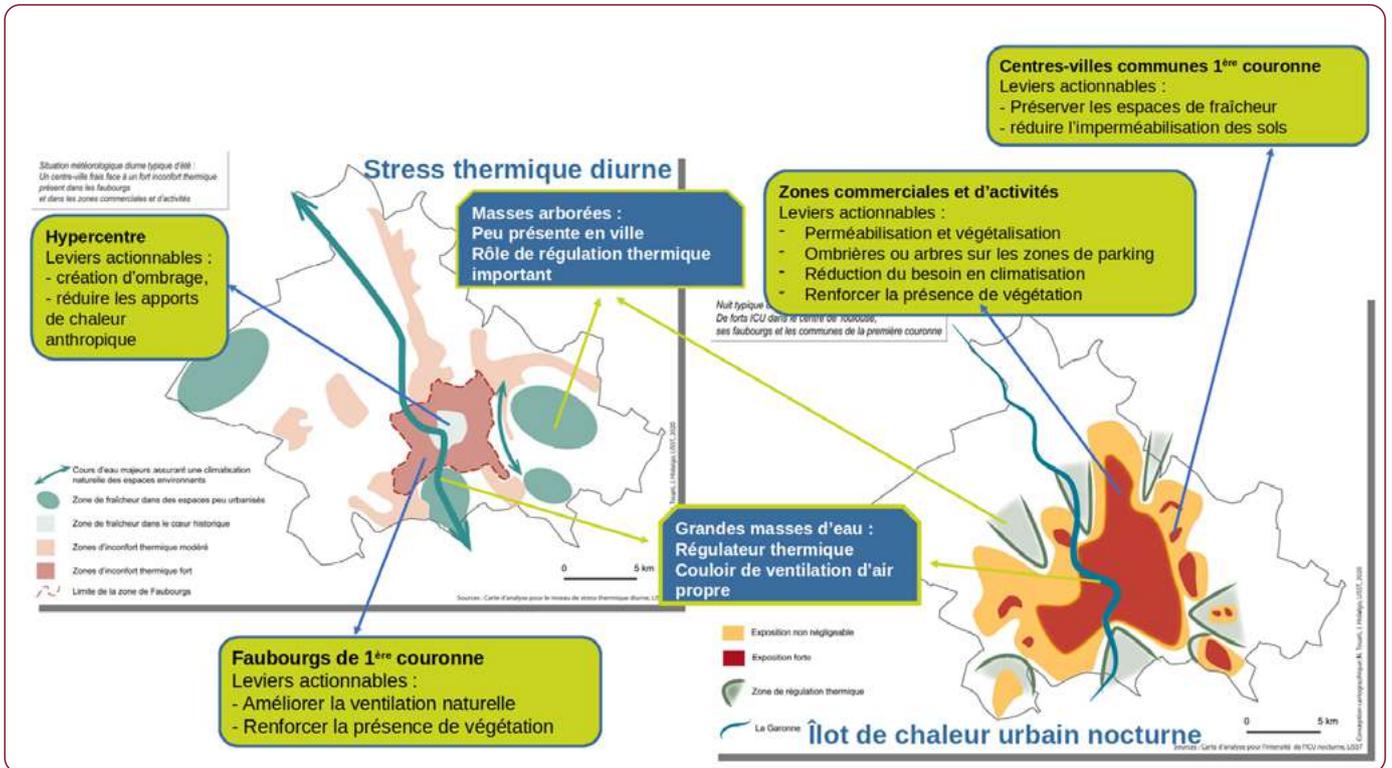


Figure 5.13. Exemple de cartes climatiques des zones à enjeu pour l'îlot de chaleur urbain nocturne et le niveau de stress thermique diurne. Des modélisations atmosphériques ont permis de produire une cartographie des zones climatiques locales (LCZ), associant un comportement climatique à chaque morphologie urbaine, ainsi qu'une cartographie du phénomène de l'îlot de chaleur urbain (ICU), modélisé en fonction des situations météorologiques locales les plus significatives. (Source : Guide de recommandations « Prise en compte du climat dans la construction de la métropole de demain », 2020)

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Cycloasis : un dispositif expérimental pour refroidir la ville grâce à la végétalisation de murs d'habitations collectives - 34

LEZCOOP - En savoir plus

La végétalisation des villes a une multitude d'avantages : climatisation, bien-être des habitants lié à l'acoustique, l'esthétique, l'amélioration de la biodiversité, et l'appropriation positive de l'espace public. Le réchauffement climatique exerce de fortes pressions sur la qualité et la disponibilité des ressources en eau, le cadre et les conditions de vie, etc.

Le dispositif Cycloasis est une innovation basée sur des technologies simples et sobres et est menée en conditions réelles, sur des murs végétalisés et irrigués par des eaux grises et jaunes. Cette expérimentation est scientifiquement et juridiquement encadrée. Les résidents de l'habitat participatif sont les acteurs de l'expérimentation. Le fonctionnement de leur immeuble constitue un site démonstrateur permanent, qui favorise le retour d'expérience et le transfert de compétences et de données.

Des mesures - sur la biodiversité, la climatisation et les économies d'eau - sont rapportées sur le site Internet du projet. Son objectif : être déployé sur d'autres lieux.

Rafraîchissement urbain par des murs végétaux irrigués à partir du recyclage low tech des eaux usées d'un habitat participatif.

Le constat

- Difféquer dans de l'eau potable...
- Utiliser des climatiseurs, qui consommation de l'énergie et réchauffent la ville...
- Mettre de l'eau potable dans les espaces verts en période de sécheresse... pourra-t-on se le permettre encore longtemps ?

Notre solution

Nos recherches

- Démonstrateur avec capteurs de température, module avec mur végétal et module témoin.
- Succès du rafraîchissement par les parois végétalisées.
- Sélection des plantes les mieux adaptées parmi plus de 60 espèces.

L'objectif de ce projet est de prouver qu'avec, assez peu de technologie, un investissement raisonnable et peu de maintenance, la valorisation d'un ensemble de biodéchets et liquides est possible en augmentant notre qualité de vie dans une région où les pics de chaleurs seront un enjeu considérable à gérer.

Partenaires et financeurs

LezCoop, Casalez, ECOSEC, ecofilae, surya, Occitanie

9. Quelles données et informations pour l'adaptation des villes ?

Eric BARBE (INRAE - TETIS), Xavier BRIOTTET (ONERA), Julia HIDALGO (CNRS - LISST), Gabriel POUJOL (OPenIG), Christiane WEBER (CNRS - TETIS), Valéry MASSON (Météo-France et CNRS - CNRM)

Comprendre la ville et son fonctionnement nécessite l'utilisation de données d'origines multiples et hétérogènes dont l'accessibilité est adaptée à une grande diversité d'interlocuteurs : recherche, collectivité locale, industriels... De plus, la compréhension du fonctionnement de la ville est réalisée à différentes échelles spatiales (la ville et son environnement, le quartier, le bâtiment...) et temporelles (extension urbaine, végétation urbaine, modes de vie et de déplacement...) dépendant ainsi de l'objet d'intérêt. Ces informations sont essentielles pour aider et améliorer la gouvernance d'une ville et du bien-être de ses habitants (santé, adaptation au changement climatique...).

Plusieurs niveaux d'informations existent : données « sur étagères » mobilisables par tous (p. ex. base de données (BD) cartographiques de l'IGN), données existantes mais nécessitant des traitements supplémentaires (p. ex. BD imperméabilisation des sols), données issues de la recherche encore en réflexion (ex Projet ThermoVille, MApUCE). Ces informations sont issues de différentes sources : structures partagées, collaboratives ou opérationnelles (OPenIG), réseaux de mesures (p. ex. météo), mesures aéroportées ou satellitaires, modélisation urbaine ou climatique.

Les données disponibles peuvent être organisées en quatre grandes classes :

- les bases de données urbaines comprenant l'information 3D d'une ville, le type de matériau et l'occupation du sol (perméable ou imperméable), les propriétés optiques mais également des indicateurs multifonctionnels, socioéconomiques, santé (confort, bien-être) ;
- les données de télédétection à même de couvrir l'ensemble de la ville et de son environnement donnant accès à des informations sur l'organisation générale de la ville, la structure des bâtiments, de la végétation, des îlots de chaleur urbain suivant la résolution spatiale et le domaine spectral utilisés ;
- les réseaux de mesures continues dans la ville comme les stations météorologiques et les mesures de pollution de l'air ;
- les données climatiques et microclimatiques issues de la modélisation numérique.

Bases de données urbaines et d'occupation du sol

Plusieurs jeux de données sont disponibles :

1) Le suivi de l'artificialisation par images satellitaires en Occitanie : le projet ArtiSols

Dès 2007 des travaux ont été engagés en région Languedoc-Roussillon à la demande de la DRAAF (Direction Régionale de l'Agriculture, de l'Alimentation et de la Forêt) pour quantifier et qualifier l'artificialisation du territoire. Cette demande traduisait une préoccupation d'objectivation et de suivi de l'artificialisation, dans la perspective de préservation des sols à fort potentiel agronomique (identification et sécurisation d'un potentiel stratégique de production agricole).

L'image satellitaire a été retenue comme support de travail compte tenu de sa capacité à couvrir un large territoire en quelques dates, permettant d'obtenir une « photographie » continue et cohérente en termes d'occupation du sol. Ces travaux ont été étendus à l'ensemble du territoire Occitanie dans le cadre d'un projet Région - FEDER (AAP Recherche et société 2018) piloté par l'UMR TETIS (Maison de la télédétection, Montpellier) : le projet ArtiSols. La DRAAF, la Région Occitanie et la société BRL ont activement participé à ce projet en tant que prescripteurs des besoins pour les services de l'État, les collectivités et les aménageurs. Les résultats (couches d'informations SIG, indicateurs synthétiques) seront en libre diffusion dès la fin du projet (2021).

Comme en 2007, les travaux ArtiSols (2018 - 2021) comportaient également une cartographie d'indices de potentiel agronomique et de fonctionnalité des sols (UMR LISAH, UMR ECOOMP) permettant d'appréhender la « qualité » des sols. Une chaîne de traitement a été conçue spécifiquement pour la cartographie des espaces artificialisés. Entièrement automatisée, elle mobilise des outils et méthodes d'intelligence artificielle (deep learning, machine learning) pour la classification d'images satellitaires à très haute résolution spatiale (Spot 6/7, 1,5m). Elle a permis de produire en une dizaine de jours de traitements automatiques 1) une cartographie de bâtiments résidentiels et d'activité (**figure 5.14**) et 2) une occupation du sol simplifiée (**figure 5.15**), et ce, à l'échelle de la région Occitanie et pour 5 millésimes (2015, 2016, 2017, 2018, 2019).

Ces résultats ont été évalués (qualité des résultats de classification, calcul de métriques de précision spécifiques pour les bâtiments) afin de garantir leur niveau de fiabilité. Ces produits (cartographie des bâtiments, occupation du sol), aisément reproductibles à un pas de temps annuel (couverture Spot 6/7 annuelle disponible gratuitement pour les acteurs publics auprès de [DINA-MIS](#)) et de façon automatisée (10 jours pour traiter la région Occitanie sans intervention d'un opérateur) participent à la connaissance et au suivi de facteurs importants du changement climatique.

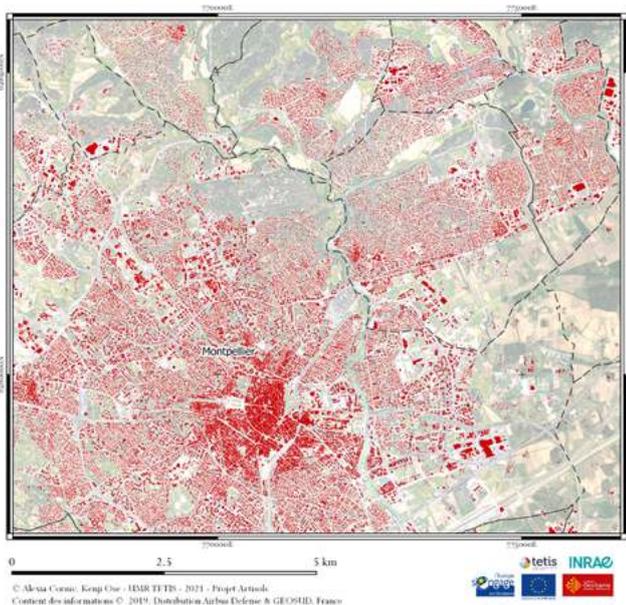


Figure 5.14. Bâtiments résidentiels et d'activité.
(Source : Cf. auteurs de la contribution)

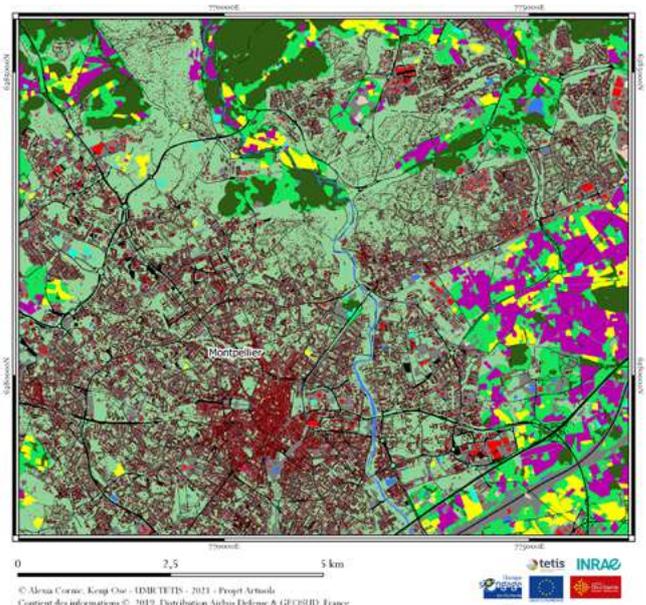


Figure 5.15. Occupation du sol simplifiée.
(Source : Cf. auteurs de la contribution)



Figure 5.16. Échelles spatiales de la base de données urbaine MApUCE (a) bâtiment, (b) bloc et (c) îlot urbain aussi appelé unité spatiale de référence, USR
(Source : Hidalgo et al., 2019)

2) Une base de données typo-morphologique issue des projets ANR-MApUCE et PÆNDORA

Trois échelles spatiales sont disponibles : la base de données urbaine contient un ensemble d'indicateurs calculés à trois échelles spatiales correspondant au bâtiment, au bloc de bâtiments et à l'îlot (**figure 5.16**) sur la base d'un jeu de données d'entrée de 2015 fourni par les instituts français de statistique (INSEE - Recensement) et de géographie (IGN - BDTOPPO, BD Parcellaire). Les îlots urbains sont délimités par le réseau routier, le réseau hydrographique et d'autres éléments segmentant l'espace (**Bocher et al., 2018**).

Les indicateurs à l'échelle de l'îlot sont disponibles en accès libre [en ligne](#). 64 indicateurs sont disponibles au total, organisés en 5 catégories : le nombre d'éléments (bâtiments, blocs), des caractéristiques de surface (densité surfacique des bâtiments, végétation et routes par exemple), les distances (distance entre les bâtiments, entre les bâtiments et les routes pour chaque îlot), la forme (volume du bâtiment, compacité du bloc et hauteur moyenne du bâtiment par îlot) et finalement la catégorie « autres » rassemblant des indicateurs pertinents

dans le cadre des études de microclimat urbain et architecturales (volume passif, direction principale, cours intérieures). À partir de ce jeu d'indicateurs morphologiques et d'occupation du sol, plusieurs indicateurs dérivés ont été produits. Leur utilisation permet de faciliter la compréhension du tissu urbain à partir d'une analyse architecturale des bâtiments typiques de France associée aux indicateurs morphologiques précédents. **Tornay et al. (2017)** définissent 10 archétypes architecturaux représentatifs de la plupart des bâtiments français et attribuent une classe de typologie urbaine à chaque bâtiment de la BD MApUCE.

À l'échelle de l'îlot, le pourcentage de chaque type est ainsi disponible (**figure 5.17**). Une typologie complémentaire a également été produite par **Hidalgo et al. (2019)** prenant en compte l'agencement des bâtiments au sein des quartiers et leurs impacts microclimatiques potentiels. Cette typologie en Zones Climatiques Locales, appelée en anglais « Local Climate Zones, LCZ » (**figure 5.17**) est couramment utilisée par la communauté de chercheurs en climatologie urbaine et commence à être utilisée au niveau opérationnel par plusieurs villes en France comme Paris, Nancy ou Toulouse (**Dumas, 2017**).

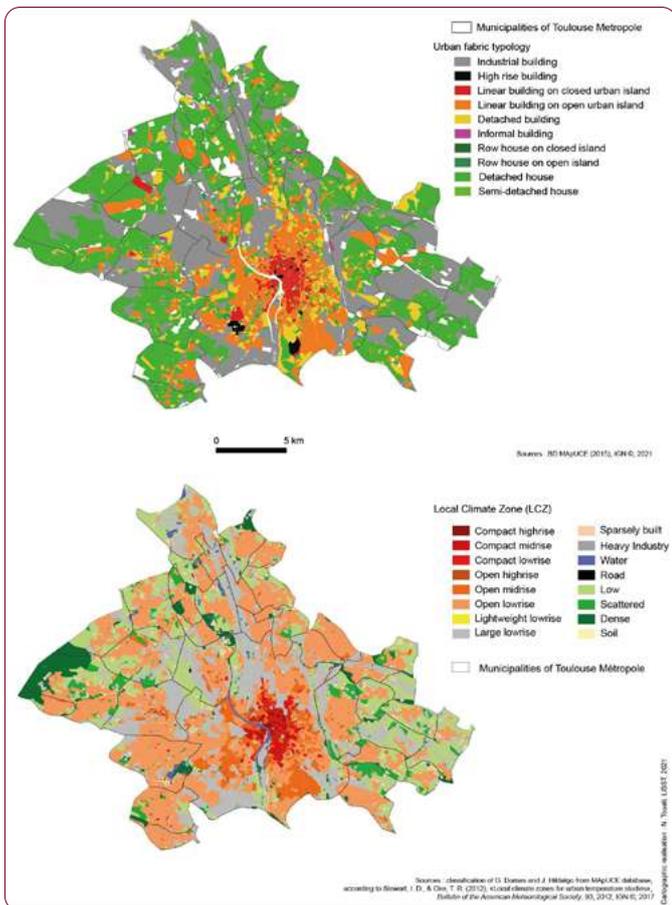


Figure 5.17. Archétypes architecturaux et zones climatiques locales sur le périmètre de Toulouse Métropole (Source : Hidalgo et al., 2021)

Données climatiques mobilisables à l'échelle urbaine sur la région Occitanie

Information climatique non spatialisée

Météo France propose actuellement une analyse de l'évolution observée passée des températures, des précipitations et des phénomènes extrêmes sur le portail de données d'observation du climat de Météo France, [Climat HD](#). D'une manière complémentaire, le projet de recherche ADEME-PÆNDORA a permis de caractériser le contexte climatique local à travers des types de temps. Il s'agit alors d'identifier les situations météorologiques les plus fréquentes sur le territoire. Du fait de leurs probabilités d'occurrence, elles permettront par la suite d'appuyer des priorités d'action en fonction des enjeux urbains qu'elles soulèvent (par exemple, l'amélioration du confort d'été). Une analyse des types de temps météorologiques a été faite pour Toulouse, Montpellier, Nîmes et Perpignan (disponible sur demande).

Information climatique spatialisée

Le manque de connaissances fines à l'échelle territoriale, à la fois sur les effets locaux de l'évolution du climat régional et global à long terme et sur les modifications microclimatiques engendrées par l'urbanisation en elle-même, rend difficile la prise en compte du sujet à part entière dans l'urbanisme. Plusieurs avancées dans ce sens ont été produites ces dernières années :

- L'accès à des données atmosphériques à haute ré-

solution spatiale issues d'un réseau d'observation à l'échelle urbaine reste rare dans les villes françaises. **Sur la région Occitanie, seule Toulouse a mis en place depuis 2018 (Dumas, 2021) un monitoring du climat local en temps réel.** Il est directement géré par la collectivité et les données sont consultables sur leur plateforme [Open Data](#).

- Quelques campagnes de mesure ponctuelles plus ou moins longues ont également été réalisées sur Toulouse (à l'échelle urbaine CAPITOU, de février 2004 à mars 2005 ; à l'échelle du quartier, PIRVE 2008, EUREQUA 2015, CAMCATT 2021).

- Les données de télédétection ou aéroportées ont le grand avantage de fournir une couverture spatiale très riche, mais l'accès uniquement à des variables caractérisant les surfaces urbaines (toitures et chaussées) représente une vraie limite pour la production d'indicateurs d'impact sur la santé ou la caractérisation spatiale et temporelle de phénomènes microclimatiques comme l'îlot de chaleur urbain qui sont caractéristiques de l'atmosphère à l'intérieur de la rue (**voir section 1**). Disposer d'une station météorologique en centre-ville d'une ville ou d'un village permettrait déjà d'y quantifier l'intensité maximale de l'îlot de chaleur urbain.

Enfin, les villes offrent des opportunités d'accès à des données connectées issus de nombreux systèmes, comme les stations météorologiques citoyennes connectées (mais très souvent hors abri donc trop chaudes quand exposées au soleil) ou même des données provenant des capteurs de température de l'air des voitures connectées. L'exploitation (et même l'accès) à de telles données relève encore complètement du champ de la recherche, mais ouvre des perspectives d'utilisation à long terme, d'ici 5 ou 10 ans.

Information de température de surface spatialisée

Tout de même, la grande disponibilité de données satellitaires en France a entraîné l'usage par plusieurs collectivités de ce type de données pour leurs premières études de vulnérabilité microclimatique. Le choix des données de télédétection dépend de l'échelle d'observation, régionale ou locale :

- A l'échelle régionale, les instruments de résolution spatiale kilométrique (Meteosat, AVHRR-NOAA) sont adaptés pour suivre l'extension urbaine sur de grandes périodes de temps car les acquisitions sont disponibles depuis plusieurs dizaines d'années. De plus, cette famille d'instruments assure une prise de vue sur la même zone au moins une fois par jour, rendant possible l'identification des principaux îlots de chaleur de surface dans une ville.

- A l'échelle locale, les instruments de moyenne résolution typiquement entre 50 et 100 m tels que Landsat, ASTER ou plus récemment ECOSTRESS dans le domaine infrarouge thermique fournissent des cartographies d'îlot de chaleur mieux résolues à l'échelle du quartier. Leurs principales limitations résident dans leur revisite faible de l'ordre de quelques images par

an. En complément de ces données, la cartographie des sols urbains ou le suivi de sa végétation arbustive nécessitent l'utilisation de données mieux résolues spatialement (de 5 à 10 m) comme Sentinel-2 (revi-site 3 jours), Venus (revi-site 1 jour sur Toulouse) ou SPOT6/7 (revi-site 1 jour). Enfin, le système Pléiades donne accès à la géométrie des bâtiments par ses capacités stéréoscopiques.

Les données citées (Landsat, Venus, Spot et Sentinel) sont disponibles [en ligne](#) en unité de réflectance dans le domaine visible et proche infrarouge. Les produits en température de surface Landsat, Meteosat, AVHRR-NOAA et ECOSTRESS sont disponibles sur leur site de distribution de données respectifs. Enfin, plusieurs campagnes aéroportées ont été réalisées sur des villes d'Occitanie soit à des fins de recherches (campagnes CAPITOU, UMBRA, AI4GEO sur Toulouse, résolution spatiale typique entre 0,50 à 2 m) soit à la demande d'une communauté pour par exemple la construction de modèle numérique de surface précis (à l'aide d'un Lidar ou par stéréoscopie, cartographie IGN). Ces données sont accessibles en formulant une demande auprès du propriétaire des données.

Information microclimatique et climatique spatialisée via la modélisation numérique

L'accès à de la modélisation climatique à l'échelle urbaine à des résolutions horizontales intéressantes pour des applications en planification urbaine (~ 250 m) est une réalité depuis une dizaine d'années pour des applications de recherche, et ce type de modélisation commence à être disponible pour des projets de climatologie urbaine appliquée plus opérationnels ([Météo France, 2021](#)). Des simulations microclimatiques ont été produites dans le cadre du projet de recherche MAPUCE pour une cinquantaine de villes en France dont Toulouse, Montpellier et Nîmes ([Gardes et al., 2020](#)).

Dans ce cadre des informations concernant l'îlot de chaleur urbain pour deux situations météorologiques (types de temps) favorables à son développement ainsi que des informations sur la direction et l'intensité du vent sont disponibles. Finalement, Météo France propose une caractérisation du climat futur (températures, précipitations, phénomènes extrêmes) à partir de simulations climatiques. Ces simulations offrent une vision des perspectives climatiques à plusieurs horizons temporels (proche, moyen, lointain) et selon différents scénarios de lutte contre les émissions de CO₂ (pessimiste, inter-

médiaire, optimiste). On retrouve ces informations sur le portail dédié des simulations climatiques de Météo France, DRIAS les futurs du climat.

Les bases de données régionales (OPenIG)

Par l'intermédiaire de son Infrastructure de Données Géographiques et Ouvertes (IDGO), OPenIG (plateforme régionale associative pour l'information géographique en Occitanie) rassemble de nombreux jeux de données au sein de la région Occitanie. En respectant les prescriptions règlementaires spécifiques à chaque jeu de données, OPenIG diffuse les référentiels nationaux (BD Forêt, référentiel à grande échelle et ortho-photographies de l'IGN, fichiers fonciers de la Direction Générale des Finances Publiques (DGFIP) par exemple) et de nombreux jeux de données liées aux thématiques de travail de ses membres, dont les origines varient : établissements publics, collectivités et établissements publics de coopération intercommunale (EPCI), État, associations, entreprises, personnes physiques, etc. Les jeux de données sont recensés et visualisables dans le catalogue [en ligne](#) de l'IDGO d'OPenIG et disponibles en téléchargement et en flux Web Map Service (WMS) et Web Feature Service (WFS) élaborées par l'Open Geospatial Consortium ([OGC](#)) sous licence ouverte ou en accès restreint aux membres de l'association à l'initiative des membres d'OPenIG qui en sont les dépositaires.

Certains de ces jeux de données, de couverture régionalement hétérogène, apportent des éléments de contexte qui peuvent localement alimenter une démarche de suivi du changement climatique. La [figure 5.18](#) présente les jeux de données disponibles, classés ici en trois sous-types de facteurs de suivi et de contextualisation du changement climatique. Ces données couvrent des périmètres variés à des granularités et des millésimes très divers, mais ils témoignent de la richesse des processus de remontée déjà en place. Sur la base de ces expériences, en fonction de besoins spécifiés et validés par la gouvernance de l'association, OPenIG peut exercer son rôle de courroie de transmission entre des dynamiques régionales, locales et nationales, à travers l'animation territoriale. Il s'agit de programmer des actions thématiques incitatives pour amener les membres d'OPenIG à publier sur l'IDGO les données dont elles disposent - sous la licence de diffusion qui leur convient - en vue d'alimenter le suivi du changement climatique à l'échelle régionale.

Encadré 5. B. Les bases de données socio-économiques

Des données sont actuellement accessibles à partir de plateformes en ligne comme l'INSEE, à partir desquelles des informations sur la population, les activités, le logement, etc. sont à disposition moyennant quelques choix de critères. La législation actuelle dans le cadre de l'Open data et de l'Open science poussent à la mise à disposition d'un grand nombre de données. Cependant beaucoup reste à faire auprès de différents acteurs, comme la collecte et la structuration de données de sol opérées par les bureaux d'étude, ou encore les informations issues d'études de recherche ou d'opinion, mêlant données qualitatives et quantitatives. En effet, malgré des efforts réels des institutions de recherche au travers d'infrastructures de recherche comme [Huma-Num](#), ou encore [PROGEDO](#) centré sur les données d'enquête, de nombreuses informations au niveau local nécessitent encore des efforts de structuration et d'accessibilité.

Facteurs environnementaux	Suivi de l'occupation du sol	Éléments de suivi des activités anthropiques
BD Sol (pédopaysages 99)	OcSol ex LR	Comptage trafic routier
Inventaire faune flore	OCS GE	Pollution lumineuse
Préservation des Espaces Agricoles et Naturels Périurbains	OCS différentielles (ex Narbonne 2003, 2012 et 2015.)	Production de bois énergie
Espaces naturels sensibles	Ossature OCS GE	Stations d'épuration et points de rejet des effluents traités de l'Hérault (34)
Unités agroclimatiques de l'Hérault	Taches urbaines	
Stations météorologiques dans l'Hérault	Représentation simplifiée des surfaces urbanisées (34) 2015	
Risques naturels	BD Foret	
Repères de crues	BD ortho	
Mouvements de terrain		
Zones inondables		
Réseau Piezométrique (34) depuis 2003		
Qualité des eaux souterraines (34)		

Figure 5.18. Sous-types de facteurs de suivi et de contextualisation du changement climatique.
(Source : OPenIG)

CROCC_2021





CHAPITRE

6

**MILIEUX
LITTORAUX**

Coordination : Yann BALOUIN, Hélène REY-VALETTE et Rutger DE WIT.

Rédaction : Ariane ATTEIA, Yann BALOUIN, Béatrice BEC, François BOURRIN, Valérie DEROLEZ, Rutger DE WIT, Perrine FLEURY, Jean Marc FROMENTIN, Angélique GOBET, Hugues HEURTEFEUX, Catherine JEANDEL, Camille LABROUSSE, Franck LAGARDE, Antoine LEBLOIS, Wolfgang LUDWIG, Pierre MAUREL, Behzad MOSTAJIR, Fabien MOULLEC, Sylvain PIOCH, Ignacio PITA, Julie REGIS, Hélène REY-VALETTE, Marion RICHARD, Sylvain RIGAUD, Mahrez SADAoui, Marie-Agnès TRAVERS, Francesca VIDUSSI.

1. DÉFINITION, ENJEUX ET PÉRIMÈTRE D'ANALYSE

Hélène REY-VALETTE (UM - CEE-M), Yann BALOUIN (BRGM Occitanie), Rutger DE WIT (CNRS - MARBEC)

La définition géographique du littoral est souvent sujette à discussion, s'agissant d'une zone d'interface entre la mer et la terre, qui, à ce titre, est à la fois très riche en termes de biodiversité et très convoitée au niveau des usages et de l'occupation du sol. En terme opérationnel, les territoires littoraux sont le plus souvent définis par les communes littorales au sens de la loi Littoral qui, depuis 1986, limite l'urbanisation de ces zones.

De plus en plus souvent, notamment pour les questions de gouvernance, l'échelle de référence est celle des SCOTs littoraux au sein desquels les communes strictement littorales, au sens de celles concernées par la gestion du trait de côte et les activités marines, ne représentent en général qu'un petit nombre de communes. Or les territoires littoraux qui associent à la fois des activités d'économie résidentielle et d'économie bleue à la fois touristique et maritime, sont fortement vulnérables au changement climatique avec des différences d'approches importantes selon les types d'aléas considérés. Nous établissons une partition, qui sera reprise pour structurer ce chapitre, entre :

- la montée du niveau de la mer et ses impacts sur l'érosion et la submersion avec des conséquences :
 - sur les politiques et modes d'habiter le littoral ;
 - sur la destruction des habitats dunaires et des zones humides, mais également la possibilité

de recréer ces habitats ailleurs en cas de renaturalisation (retrait stratégique, destructions d'infrastructures, abandon d'exploitations salinières) ;

- les transformations biophysiques des milieux marins et saumâtres (température de l'eau, acidification, salinité...) qui vont impacter la biodiversité (répartition des espèces et multiplication de certains processus comme le développement d'espèces invasives ou les contaminations bactériennes) et les activités de pêche et de conchyliculture qui dépendent de ces milieux.

Une partie spécifique est dédiée à la question de l'observation qui occupe une place centrale, à la fois parce que les milieux littoraux sont plus difficiles à instrumenter comparativement aux milieux terrestres, et parce que la question de la disponibilité des données va devenir de plus en plus stratégique face aux incertitudes croissantes générées par le changement climatique. Il s'agit en effet :

- d'améliorer la connaissance et le suivi de ces changements de façon à pouvoir les anticiper et concevoir des mesures d'adaptation évolutives pour s'ajuster aux bifurcations éventuelles ;
- de suivre les effets des mesures d'adaptation afin de proposer des correctifs dans le temps.

2. L'ADAPTATION A LA MONTEE DU NIVEAU DE LA MER : ANTICIPER ET S'ADAPTER A L'ÉROSION ET A LA SUBMERSION MARINE

Coordination : Hélène REY-VALETTE (UM - CEE-M) et Yann BALOUIN (BRGM Occitanie)

2.1 Axes et équipes de recherche en Occitanie

Concernant la montée du niveau de la mer, il est possible de caractériser les recherches menées autour de deux axes, à savoir, d'une part les travaux visant à caractériser les processus et à évaluer la vulnérabilité des

territoires et d'autre part, ceux qui portent sur l'élaboration et la mise en œuvre des mesures d'aménagement et d'adaptation, avec au sein de chacun de ces axes plusieurs sous thèmes (figure 6.1). Au total, la recherche en Occitanie dans ce domaine est très active avec une quinzaine d'équipes plus ou moins spécialisées impliquant des disciplines très variées. On note cependant un déficit relatif concernant les sciences sociales.

Thème	Équipes concernées en Occitanie
Caractérisation des processus et de la vulnérabilité	
Géomorphologie	ASM, BRGM, CEFREM, GM, EID Méditerranée, LEGOS, L2C, LA
Perception et mémoire des risques	ASM, BRGM, CEE-M, CEFREM, LAGAM
Mesures d'aménagement et d'adaptation	
Génie côtier	BRGM, CEFREM, EID Méditerranée, GM, C2MA
Génie écologique	CEFE, C2MA, EID Méditerranée, CEFREM
Design acceptabilité et gouvernance des politiques d'adaptation	ART-DEV ; BRGM, CEE-M, CEPPEL, EID Méditerranée, ESPACE-DEV, G-EAU, LAGAM

Figure 6.1.
Présentation des types de recherche et des équipes impliquées

2.2 Compréhension et gestion des processus sédimentaires et du trait de côte

La façade littorale de la région Occitanie s'étend sur un linéaire d'environ 220 km. Les côtes sableuses représentent environ 90 % du linéaire total et sont constituées de différents ensembles : les plages, les dunes et lidos, les lagunes et étangs littoraux.

Entre Le Racou (commune d'Argelès-sur-Mer) et la frontière ouest de la Camargue, le littoral sableux est entre-

coupé de plusieurs caps naturels rocheux (Leucate, le Cap d'Agde et le Mont St Clair) qui forment des frontières naturelles pour la dérive littorale.

La quasi-totalité du littoral est constituée de basses plaines, particulièrement vulnérables à l'élévation du niveau de la mer et ses incidences sur les risques côtiers de submersion marine et d'érosion côtière.

Évaluation de l'impact des apports fluviaux, ouvrages et activités

François BOURRIN (UPVD – CEFREM), Mahrez SADAoui (UPVD – CEFREM), Camille LABROUSSE (UPVD – CEFREM), Wolfgang LUDWIG, (UPVD – CEFREM)

Les fleuves côtiers du pourtour du Golfe du Lion (Tech, Têt, Agly, Aude, Orb, Hérault, Lez, Vidourle) ont un caractère torrentiel, soumis aux aléas du climat méditerranéen. L'essentiel des apports d'eau et de matières se déroulent en quelques jours depuis les bassins versants jusqu'à la zone côtière lors des crues de type cévenol. Malgré les épisodes exceptionnels de crues associés aux tempêtes Gloria et Vera de 2020, selon l'observatoire des tempêtes il n'y a pas eu plus d'événements extrêmes durant les dernières décennies. Au contraire, on a observé une diminution du débit global ainsi que du nombre annuel de jours de crue notamment sur le fleuve Têt depuis les années 1980, ce qui implique une diminution généralisée des apports de sédiments à la zone côtière.

Concernant l'impact de l'homme, les travaux récents (Sadaoui et al., 2016) montrent que les barrages jouent un rôle majeur dans le stockage des sédiments dans les bassins versants des fleuves du Golfe du Lion en diminuant de presque 65 % les apports à la zone côtière. Cette perte se répercute directement au niveau du littoral où le déficit sédimentaire induit un recul du trait de côte sur la majeure partie du pourtour du Golfe du Lion (projet Revolsed, Brunel et al., 2014). Les programmes d'observation actuels soutenus par le ministère de l'environnement visent à mieux suivre l'évolution des débits liquides et solides des fleuves côtiers méditerranéens afin de mieux prédire l'évolution future des apports au littoral sous les effets des changements climatiques et des aménagements.

L'apport des méthodes douces

Hugues HEURTEFEUX (EID Méditerranée)

Concernant la gestion des dynamiques sédimentaires qui constituent le moteur de l'accumulation (accrétion) ou du départ (érosion) de sable sur les littoraux meubles, les solutions douces pour limiter l'érosion et maintenir des zones de protection (infrastructures naturelles) contre la submersion sont mises en place dans un objectif de travailler non pas contre, mais avec la nature. En effet les solutions douces intègrent les forçages météo (vents, vagues, courants) avec une pérennité et efficacité relatives, car si les forçages sont trop forts, l'ouvrage se disloque.

Les plus connus parmi ces types d'ouvrages sont instal-

lés sur les dunes et visent à en limiter l'érosion. Il s'agit de ganivelles ou brise vents, c'est-à-dire des palissades en bois de taille ou bois fendus, de hauteur et d'espacement variables constitués le plus souvent par des lattes de châtaigniers (figure 6.2).

Le principe est qu'un obstacle vertical favorise le dépôt de sédiments à sa base par piégeage éolien. Ces techniques sont le plus souvent assez peu onéreuses, facilement déployables et s'intègrent bien dans le paysage. A terme, elles peuvent contribuer à une amélioration de la biodiversité locale (nouveaux habitats) et de la qualité paysagère des sites.



Figure 6.2. Ouvrage de réhabilitation dunaire en Occitanie en 2005 lors de l'installation, puis en 2011 (Source : Hugues Heurtefeux)

2.3 Évaluation de la vulnérabilité des territoires et des aquifères côtiers

Vulnérabilité du trait de côte

Yann BALOUIN (BRGM Occitanie)

Le littoral d'Occitanie est caractérisé par des basses plaines côtières, particulièrement vulnérables aux effets du changement climatique, et en particulier à l'augmentation du niveau de la mer. Aujourd'hui, 25 % du trait de côte régional est en recul et 30 % du linéaire est stabilisé artificiellement (ouvrages ou rechargements récurrents). Si l'évolution du trait de côte observée aujourd'hui est essentiellement liée à la dynamique actuelle (vagues, courants, tempêtes), au déficit du stock sédimentaire et aux actions anthropiques (aménagements côtiers, aménagements des bassins versants), l'élévation du niveau de la mer va induire une intensification des impacts des tempêtes dans le futur.

L'augmentation du niveau de la mer entraîne naturellement un recul du trait de côte qui est associé à une translation du prisme sableux vers les terres. Dans le cas de l'Occitanie, ce recul, souvent contraint par l'urbanisation, se traduira par l'amaigrissement progressif des plages, voire leur disparition. La quantification de ce recul reste toutefois complexe, et seuls des modèles simples, tels que la loi de Bruun (1966), permettent, avec des hypothèses simplistes, de prévoir ces évolutions.

A titre d'exemple, [Desmazes et al. \(2020\)](#) ont estimé un recul du trait de côte de l'ordre de 59 m à échéance 2100 sur le lido du Petit-travers à Mauguio-Carnon. Les travaux réalisés en 2011 ([Artélia, 2011](#)) à échéance 2100 indiquaient que la majorité du littoral du Languedoc-Roussillon serait en érosion (environ 60 %), particulièrement sur le littoral au nord-est d'Agde, jusqu'à l'Espiguette où les aléas sont les plus importants. L'étude plus récente du [CEREMA \(2018\)](#) indique qu'à échéance 2100 :

- 20 % du linéaire évoluerait de manière non perceptible, en-deçà de 10 cm par an ;

- 34 % des plages avanceraient, dont 6 % avanceraient de plus de 3 m par an ;
- 46 % du linéaire reculerait, dont 27 % de plus de 50 cm par an.

Ces éléments résultent de projections des tendances historiques observées, qui n'intègrent pas d'élévation supplémentaire du niveau de la mer à horizon 2100, et ne font pas l'objet de simulation précise de la morpho-dynamique future. Or, la position du trait de côte dépend du bilan sédimentaire de la zone côtière, en fonction des apports et des pertes de sédiment dans la cellule hydro-sédimentaire. Ces bilans sédimentaires dépendent du stock présent, des apports par les fleuves et des pertes sédimentaires au large lors des tempêtes, ces différents phénomènes pouvant également être modifiés par les effets du changement climatique. Par ailleurs, du fait de l'élévation du niveau moyen de la mer, ces côtes basses sont susceptibles d'être plus régulièrement submergées.

Les études prospectives du projet MISEEVA ([BRGM, 2013](#)) ont montré qu'en région Occitanie, les superficies concernées par la submersion récurrente seront multipliées par 4 et la superficie des zones submergées de manière permanente pourrait atteindre près de 50 km² en 2100. Les impacts attendus sont multiples : disparition des plages et des services associés, impact sur la qualité des eaux souterraines, impacts sur les lagunes, les territoires agricoles et les territoires artificialisés. Les perspectives de recherche sur la vulnérabilité du trait de côte nécessitent de nouvelles approches, notamment en modélisation, qui permettent de simuler l'évolution du trait de côte à long terme par des modèles rapides permettant de simuler une grande quantité de scénarios pour mieux prendre en compte les incertitudes.

L'adaptation à ces effets repose aujourd'hui sur une stratégie d'atténuation des effets sur le court-moyen-terme par des rechargements en sable, une meilleure gestion des stocks sédimentaires, des initiatives d'atténuation de l'impact de tempêtes. Sur le long-terme, plutôt après 2040 pour la généralisation des expériences pilotes, des stratégies de recomposition spatiale seront mises en œuvre pour limiter la présence d'enjeux dans les zones vulnérables et renaturer la bande côtière pour lui rendre sa résilience naturelle ([André et al., 2015](#)).



Crédit photo : ©OBSCAT-BRGM (obscat.fr)

Risques de salinisation des aquifères

Perrine FLEURY (BRGM)

Dans les zones côtières, les aquifères alimentés en eau douce par la recharge issue des précipitations sont en contact avec l'eau salée d'origine marine. L'eau douce d'une densité moindre « flotte » sur l'eau salée. La pression liée à l'augmentation de la densité du fait de l'accroissement du niveau marin induit un risque accru d'intrusion saline qui prend la forme d'un biseau plongeant vers l'intérieur des terres. Ce phénomène est communément appelé « biseau salé ».

Outre l'augmentation du niveau marin, ce phénomène est renforcé par le changement des précipitations et de la température qui engendrent une diminution de la recharge des aquifères et du débit des cours d'eau côtiers en particulier en période d'étiage. Ainsi, le niveau bas des nappes favorise les intrusions salines, et la diminution des débits aux embouchures des fleuves accentue la pénétration des eaux salées qui peuvent remonter loin dans les terres puis s'infiltrer dans les nappes adjacentes. Par ailleurs, la fréquence accrue des surcotes et l'augmentation permanente du niveau marin engendreront une salinisation des terres et des aquifères selon une double temporalité :

- une salinisation « instantanée » des terres suite à la submersion marine qui concerne à l'heure actuelle des zones à proximité immédiate de la mer et des lagunes, mais aussi des zones connectées à ces milieux via le réseau hydrographique (naturel ou artificiel). De nombreuses zones humides sont aujourd'hui directement concernées ;
- une salinisation plus « inertielle ». L'augmentation du niveau de la mer conduit à une modification des équilibres, les intrusions marines au sein des aquifères vont s'accroître via une amplification de la pénétration du biseau salé (plus à l'intérieur des terres et à des profondeurs moindres).

Signalons que cette salinisation des aquifères est amplifiée par l'augmentation des prélèvements qui influence la position du biseau salé, et l'évolution de ce dernier risque de nuire à l'exploitation des eaux souterraines du fait de la dégradation de la qualité de l'eau prélevée (augmentation de la salinité).

Sur la quasi-totalité du littoral d'Occitanie, les risques de salinisation des aquifères sont avérés. La synthèse la plus récente de la vulnérabilité de ces aquifères au changement climatique a été réalisée en 2011 (Dörfliger et al., 2011) en utilisant la méthode GALDIT (Chachadi et Lobo Ferreira, 2001 et 2005). Il s'agit d'une cartographie intégrant la notion de remontée de niveau marin et fondée sur la combinaison de six paramètres regroupant les propriétés hydrauliques des aquifères (type d'aquifère, conductivité hydraulique, épaisseur, impact actuel de l'intrusion) ainsi que leur localisation (profondeur de la nappe, distance à la côte). Sur les 11 grands aquifères littoraux d'Occitanie neuf d'entre eux (localisés d'est en ouest), présentent une forte vulnérabilité (figure 6.3) :

- FRDG 504 : Limons et alluvions quaternaires du Bas Rhône et de la Camargue ;
- FRDG 102 : Alluvions anciennes entre Vidourle et Lez et littoral entre Montpellier et Sète ;
- FRDG 160 : Calcaires jurassiques pli W Montpellier et formations tertiaires, unité Thau Monbazin-Gigean Gardiol ;
- FRDG 159 : Calcaires jurassiques pli ouest de Montpellier - unité Plaisan-Villeveyrac ;
- FRDG 311 : Alluvions de l'Hérault ;
- FRDG 316 : Alluvions de l'Orb et du Libron ;
- FRDG 530 : Formations tertiaires BV Aude et alluvions de la Berre hors BV Fresquel ;
- FRDG 351 : Alluvions quaternaires du Roussillon ;
- FRDG 243 : Multicouche pliocène du Roussillon.

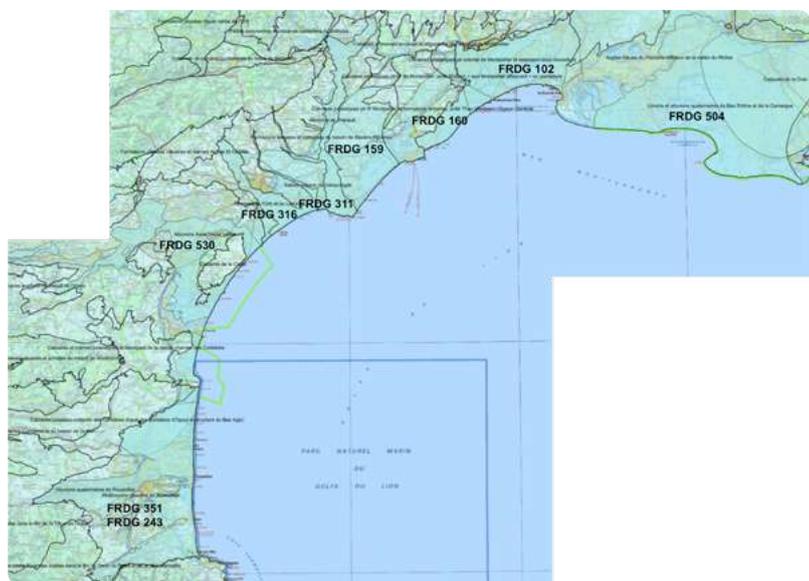


Figure 6.3. Localisation des masses d'eau littorales d'Occitanie présentant une vulnérabilité avérée au changement climatique. (Source : Dörfliger et al., 2011)

Par ailleurs, des zones de roselières se développent au sein des lagunes et des étangs côtiers sur une grande partie du littoral. Elles bénéficient d'un apport important d'eau douce, permettent le maintien d'une lentille d'eau douce en surface, salutaire au développement de la roselière. Cette lentille limite également l'intrusion du biseau salé ou le repousse en profondeur, préservant les aquifères en amont hydraulique immédiat. Zones tampon entre milieux terrestres et aquatiques, les roselières sont de ce fait les premières zones impactées par le changement climatique. Une synthèse de leur état hydrogéologique a été réalisée (Palvadeau et al., 2021). Elle montre que la plupart de ces milieux sont déjà en mutation, impactés par la remontée des niveaux marins et l'augmentation de l'intensité et de la fréquence des tempêtes. L'état de plusieurs roselières s'est déjà dégra-

dé ces dernières années, suite à des intrusions d'eau salée ou du fait de rupture de cordon dunaire lors de tempêtes. Citons par exemple les roselières du Méjan situées en bordure de l'étang de Pérols (localisé au sud de Montpellier) ou du marais de Plagnol (au nord de l'étang de Mauguio) qui ont vu la salinité des eaux superficielles et de la nappe fortement augmenter.

Une analyse de la vulnérabilité de ces roselières (Palvadeau et al., 2021) révèle que 50 % des roselières seront impactées de manière permanente (augmentation de +40 cm du niveau de la mer) ou récurrente (+70 cm en période de tempête) dès la période 2030-2050, du fait de leur proximité avec la mer ou les lagunes. Ces éléments confirment ainsi la forte vulnérabilité des aquifères littoraux d'Occitanie (figure 6.4).

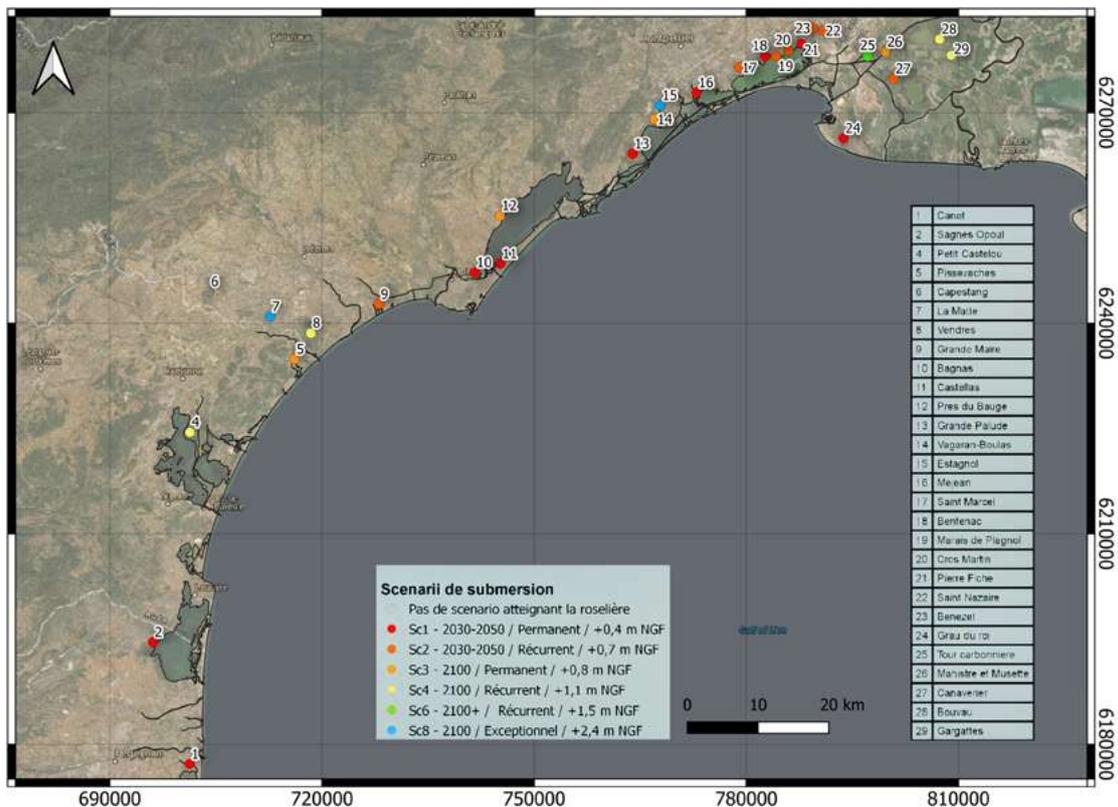


Figure 6.4. Submersion des roselières selon les différents scénarios climatiques. (Source : Palvadeau et al., 2021)

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Un projet pilote innovant et Fondé sur la Nature pour lutter contre l'érosion littorale et l'érosion de la biodiversité (PEGASE) - 34

Seaboost - *En savoir plus*

Le projet PEGASE (Protection contre l'Érosion du littoral du Grau d'Agde et Sauvegarde des Écosystèmes) repose sur le déploiement d'un projet pilote innovant de lutte contre l'érosion côtière sur la plage du Grau d'Agde. Il entre dans la catégorie des Solutions d'adaptation au changement climatique dites fondées sur la Nature (SafN) : la solution déployée s'inspire des écosystèmes de mangroves pour reproduire leur capacité à atténuer la houle et les courants incidents. Contrairement aux ouvrages traditionnels, la solution proposée est :

- perméable, assurant ainsi une performance locale sans perturbation des cycles sédimentaires régionaux ;

- modulaire et facile à mettre en œuvre car nécessitant des moyens de pose plus abordables ;
- conçue pour l'accueil et le développement de la vie et des bénéfices associés.

Elle rend ainsi accessible une approche conjointe de lutte contre l'érosion littorale et contre l'érosion de la biodiversité grâce à une approche douce, notamment sur des petits sites ou pour des collectivités aux moyens limités.



2.4 Perception et mise en oeuvre des politiques d'adaptation

Introduction

Hélène REY-VALETTE (UM - CEE-M)

Diverses enquêtes auprès des habitants (résidents principaux et secondaires), des usagers (touristes et excursionnistes rétro littoral), des élus et des parties prenantes ont été menées pour identifier leurs perceptions des risques et des types de politiques d'adaptation (projet Interreg BEACHMED, projet ANR MISEEVA, projet Interreg COASTANCE et projet OHM (Observatoire Homme Milieu du CNRS) PsychoReloc) (Rey-Valette et al., 2019). Ces perceptions, reflets de la mémoire du risque et de phénomènes de déni ou de biais cognitifs, sont déterminantes des comportements et de l'acceptabilité des mesures d'adaptation.

Par exemple, l'attachement au lieu et aux aménités procurées par la proximité de la mer conduisent à « relativiser » les risques (biais d'optimisme) d'autant qu'on note une faible mémoire des tempêtes exceptionnelles (notamment 1982 et 1997) accentuée par les caractéristiques sociodémographiques des communes littorales où on note une part importante de « nouveaux » résidents issus de migrations interrégionales et de retraités. Ainsi, on note une sous-estimation des effets du changement climatique, notamment par les résidents secondaires peu présents lors des tempêtes hivernales, mais aussi de l'impact des changements institutionnels (biais de statut quo), par exemple concernant le maintien d'un régime d'assurance solidaire et l'évolution du marché immobilier.

Les perceptions des politiques d'adaptation témoignent aussi d'importantes contraintes de mise en oeuvre des pratiques de relocalisation pour réduire la vulnérabilité. Outre l'opposition très fréquente des habitants et activités concernés, on note aussi des difficultés en termes de réserves foncières, de réglementation, de financement, d'ingénierie territoriale pour intégrer le caractère intégré et dynamique (logique d'anticipation et progressivité) des processus de gouvernance et d'aménagement. Le projet de recherche MISEEVA coordonné par le BRGM a permis d'évaluer à l'horizon 2100 les pertes économiques qui résulteraient d'une augmentation d'un mètre du niveau de mer.

On peut ainsi évaluer que **l'adaptation anticipée par une politique de relocalisation permettrait d'éviter 31,2 milliards d'euros de dommages sur la période 2010-2100, soit 69 000 euros par habitant de littoral sableux d'Occitanie en 2010 ou 135 millions d'euros/km de littoral** (Hérivaux et al., 2018). Outre le développement important des actions d'information (par exemple l'initiative Dynamique littorale du Parc Marin du Golfe du Lion ou le programme « La mer monte » du Parc Naturel Régional de la Narbonnaise), des observatoires du trait de côte (ObSCAT par exemple) et des recherches sur les

conditions de mise en oeuvre de ces politiques d'adaptation (notamment à travers des recherches partenariales sur des sites pilotes), il convient d'interroger plus généralement l'évolution des logiques d'urbanisation.

Plus récemment, l'analyse de ces politiques d'adaptation s'élargit en intégrant des dimensions psychologiques (notamment le rôle des émotions et des ressentis à travers des approches d'économie comportementale, de psychologie environnementale et d'économie expérimentale), sociales et politiques, à travers des indicateurs de résistance et de capacité d'adaptation qui intègrent l'attachement au lieu, la mobilité résidentielle, la perception du risque, la confiance dans les institutions de gestion et la conscience du besoin d'anticiper (**voir chapitre-enjeu Enjeux psychosociologiques**).

Par ailleurs, s'agissant des processus de gouvernance territoriale, le projet SOLTER a étudié la question des solidarités sociales et économiques entre les territoires littoraux et rétro littoraux, notamment dans quelle mesure les habitants des communes rétro littorales se sentent concernés en tant qu'usagers des plages ou d'actifs dépendant des flux touristiques pour repenser les échelles de gouvernance et de concertation concernant les mesures d'adaptation et leur financement (Clément et al., 2015 ; Rulleau et al., 2016 ; Dachary et al., 2019).



Crédit photo : Xavier Ducommun, 2021

Ces problématiques conduisent aussi à prendre de plus en plus en compte les questions d'équité et d'inégalité environnementale entre territoires et types de populations. De même, les recherches portent de plus en plus sur des modalités innovantes d'achat des biens et d'occupation temporaire, et plus généralement les conditions d'indemnisation, en vue d'éviter un effondrement du marché immobilier et de faciliter la maîtrise foncière des zones très exposées. Plus généralement, il s'agit aussi d'étudier l'opérationnalisation de modalités progressives et adaptatives de l'action publique.

Des systèmes d'assurance fragilisés face à l'accroissement des risques et souvent critiqués pour leur incitation au statut quo

Antoine LEBLOIS (INRAE - CEE-M)

Les risques côtiers sont couverts par des contrats d'assurance (avec des processus de réassurance), notamment le dispositif Catastrophe Naturelle (ou « CatNat »), spécifique à la France, dont le coût cependant ne cesse d'augmenter, ce qui pose à terme la question de sa pérennité. Ainsi, par exemple en Australie, où le risque d'élévation progressive du niveau de la mer ne cesse de s'accroître, aucune compagnie ne propose de couvrir ce type d'aléa dans les contrats d'assurance de biens immobiliers résidentiels.

En France, les Plans de prévention des risques naturels (PPRn) définissent les zones vulnérables, et notamment les zones non constructibles. Selon la loi, l'assureur n'est pas contraint d'accorder la garantie catastrophes naturelles pour les biens ou activités implantés dans des zones jugées inconstructibles par le PPRn. Depuis le début des années 2000, dans le cas des forêts les assureurs ne couvrent plus certaines zones jugées trop risquées, notamment sur le pourtour méditerranéen. L'imprévisibilité de ces risques est aussi une raison de la frilosité des marchés d'assurance.

Depuis leur recensement dans les années 1980, environ 1250 arrêtés de reconnaissance de l'état de catastrophe naturelle relatifs aux aléas côtiers (submersions marines essentiellement) ont été pris sur les communes littorales du territoire métropolitain (1 % de l'ensemble des arrêtés catastrophes naturelles). Le traitement des déclarations de catastrophe naturelle pour les communes littorales (52 communes) d'Occitanie permet d'identifier une tempête commune en 1982 et un nombre de submersions (inondation et chocs de vagues) pouvant aller jusqu'à 7 événements par commune sur la période 1997-2018 (figure 6.5).

Le total des communes concernées selon les années (figure 6.6) permet d'identifier trois principales submersions, en 1997, 2009 et 2018 avec respectivement 36, 24 et 18 communes concernées. Il ressort aussi que seulement 7 communes n'ont jamais eu de déclaration de submersion sur la période. Dans la perspective du renforcement de l'exposition des littoraux aux aléas côtiers du fait de l'élévation du niveau de la mer, l'implication actuelle de l'Etat pour la réparation des dommages pourrait être remise en cause, d'autant que l'exposition à ces risques côtiers est étroitement liée à la forte attractivité démographique qui implique une urbanisation croissante dans des zones exposées.

Or si les achats immobiliers sont effectués en ayant l'information sur les risques, il se pose à terme la question de la responsabilité de l'acheteur, évoquée dans le rapport récent du député Buchou (2019) et qui peut influencer les modalités d'indemnisation en cas de rachat par l'Etat dans le cadre d'une opération de relocalisation. Ce rapport propose ainsi un renforcement de l'information des futurs acquéreurs par les agences immobilières. Selon les modalités, les systèmes d'assurance sont souvent critiqués en tant que facteur renforçant le statut quo.

Les enquêtes menées en Occitanie sur la perception des populations, et dans une moindre mesure des élus, témoignent d'un biais d'optimisme par rapport à la pérennité du système CatNat actuel avec près de la moitié des personnes (44 %) qui sont optimistes et qui pensent que le système de solidarité actuel sera maintenu, mais aussi qui n'anticipent pas vraiment le risque d'une augmentation significative des cotisations d'assurance et par suite une baisse des prix de l'immobilier.

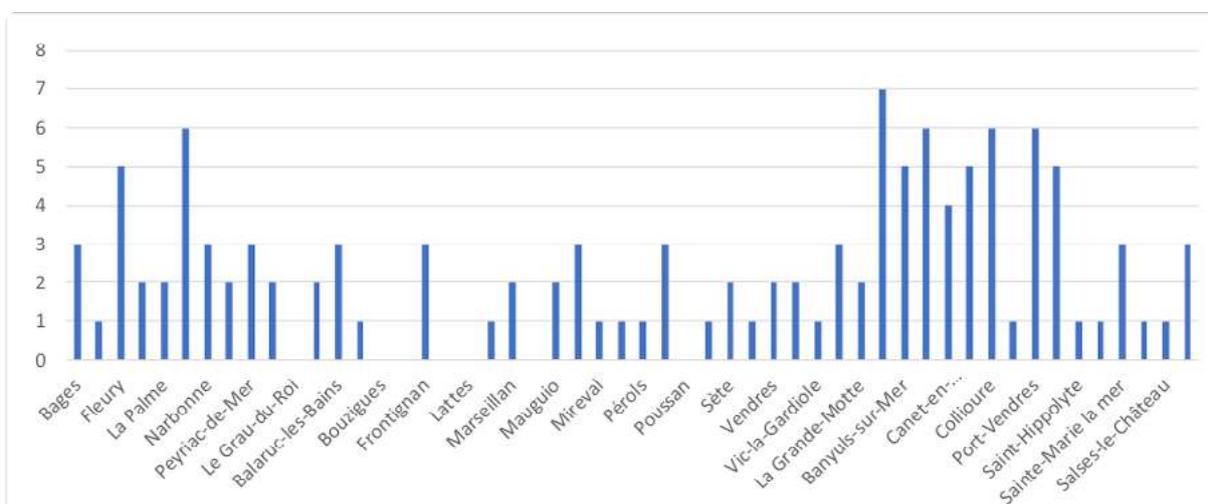


Figure 6.5. Nombre de catastrophes naturelles submersion et chocs de vagues par commune. (Source : données de Géorisques, Observatoire National des Risques Naturels, 2020)

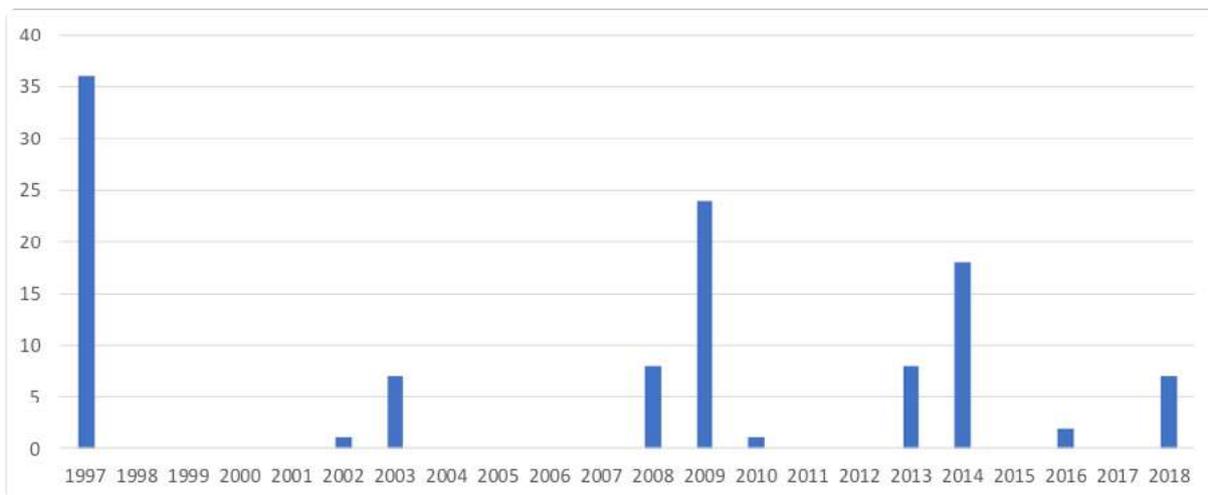


Figure 6.6. Cumul annuel de déclarations submersion pour les communes littorales d'Occitanie.
(Source : données de Géorisques, Observatoire National des Risques Naturels, 2020)

Conception de nouveaux modèles urbains pour le littoral : la ville du futur sera « une autre »

Sylvain PIOCH (*UMPV - LAGAM*)

S'adapter, changer, muter, incite à inventer de nouvelles formes d'urbanisation côtière, pour réduire l'exposition des habitants. Ainsi, les directives de l'Etat recommandent de densifier l'habitat dans les zones les moins exposées tandis que de multiples innovations sont expérimentées, voire développées selon les pays dans les zones plus exposées par exemple en proposant de l'habitat flottant pour les résidences mais aussi pour les mobil-homes et les habitations légères afin de maintenir les capacités d'accueil des campings.

Ainsi une première expérience de logements flottants en location résidentielle est expérimentée sur le port de Gruissan et le département de l'Hérault lance un concours « Habiter le littoral demain » auprès des jeunes architectes. Ces évolutions vont dans le sens d'une maîtrise de l'extension des zones urbanisées et d'une rupture des logiques résidentielles souvent fiscalement bénéfiques à court et moyen termes pour les collectivités, et qui s'inscrit plus généralement dans le cadre des nouvelles logiques de gestion des impacts environnementaux. Il s'agit notamment de la séquence Eviter Réduire et Compenser visant un objectif de Pas de Perte Nette

de biodiversité pour protéger les rares espaces naturels. Par ailleurs, les formes d'habitats et les infrastructures collectives liées expriment aussi des modes de consommation et des modes de vie tant des résidents que des touristes avec, par exemple et jusqu'à présent, la croissance continue des piscines, des fronts de mer aménagés, des ports illuminés... Or les attentes des citoyens et des touristes évoluent vers la préservation de la qualité du cadre de vie dans un environnement sain et vers la recherche d'authenticité et d'espaces naturels.

Ainsi, il s'agit d'inventer la ville du futur qui intégrera largement les enjeux et solutions environnementales, par exemple en favorisant la désimperméabilisation, les solutions fondées sur la nature, l'éco-conception, les îlots verts et la nature en ville... Autant d'injonctions agissant sur l'offre d'urbanisation, de l'architecte aux urbanistes et entreprises du BTP, dont l'application sera stimulée à la fois par de nouvelles réglementations (énergie, biodiversité, recyclage matériau, bio-sourcing, bio-inspiration) et par l'évolution des attentes et des exigences socio-écologiques tant des citoyens que des touristes.

3. LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET LA BIODIVERSITÉ DU LITTORAL

3.1 Interactions entre changements climatiques et biodiversité dans les eaux côtières

Rutger DE WIT (CNRS – MARBEC)

Au sein de leurs habitats, les organismes aquatiques seront confrontés aux changements des conditions environnementales, comme l'augmentation de la température et du rayonnement UV, l'augmentation de la pression partielle du CO₂ et la diminution du pH (acidification, voir texte 3.2). Tandis que certains organismes seront mieux adaptés à ces nouvelles conditions d'autres seront impactés négativement. Dans les écosystèmes il y aura donc des gagnants et des perdants.

Cependant, les organismes ont aussi une capacité d'adaptation, notamment à travers leur capacité de mobilité et de dispersion. Ainsi les aires de distribution des espèces pourraient s'adapter à la nouvelle géographie climatique ; dans l'hémisphère nord les espèces tendent ainsi à migrer vers le nord et ce processus paraît plus efficace en mer que sur terre (Lenoir et al., 2020). Les eaux littorales et côtières de l'Occitanie vont donc accueillir de plus en plus des espèces du sud et de l'est de la Méditerranée plus chaude. Cependant, ces changements de la distribution peuvent se heurter à des contraintes de géographie physique, comme par exemples des obstacles à la dispersion ou l'absence d'habitats appropriés plus au nord. Comme cela a été étudié pour les poissons de mer (Lasram et al., 2010), **en Occitanie, le Golfe du Lion représentera ainsi un « cul-de-sac » pour les espèces méditerranéennes adaptées aux eaux froides.** Ainsi la Méditerranée représente actuellement la limite sud de distribution de la grande zostère (*Zostera marina*), qui se trouve dans les lagunes et autres zones abritées du littoral, et qui pourrait disparaître.

Par ailleurs les changements rapides induits par les changements climatiques impactent directement les interactions entre les espèces et par conséquent plusieurs espèces natives seront impactés très négativement (voir chapitre-enjeu Milieux montagnards). Ainsi, les nouveaux arrivants pourront être des prédateurs ou concurrents redoutables pour certaines espèces natives. Les interactions entre les espèces natives seront aussi impactées par le déphasage des stades de leurs cycles de vie et de leurs périodes de croissance. Par exemple, les prédateurs peuvent être impactés négativement lorsque la densité de leurs proies est affaiblie pendant des périodes de leur besoin maximal (*mismatch*). Les interactions mutuellement positives entre espèces peuvent se rompre lorsque leurs déplacements ne vont plus de pair dans le temps et l'espace.

Globalement pour les espèces il y aura donc plus de perdants que de gagnants : les changements climatiques contribuent ainsi à l'érosion de la biodiversité, en plus des autres impacts humains (pollution, eutrophisation, destruction des habitats, surpêche et autres formes de

surexploitation, espèces invasives...). En même temps, la perte de la biodiversité compromet la capacité des écosystèmes à s'adapter aux changements climatiques. Les deux phénomènes, changements climatiques et érosion de la biodiversité, doivent donc être étudiés conjointement. Jusqu'à ce jour, cette approche intégrative a été peu développée, mais un travail récent en collaboration entre le GIEC et l'IPBES est encourageant (Pörtner et al., 2021).

Pour une démarche prospective, c'est-à-dire essayer d'anticiper les compositions des communautés aquatiques à l'horizon 2050 et 2100, les chercheurs s'appuient sur trois approches :

- l'expérimentation (voir l'exemple des mésocosmes 3.3) ;
- l'observation (notamment l'analyse des tendances déjà observées, voir le texte du phytoplancton 3.4) ;
- la modélisation mathématique.

Cette dernière approche est appliquée à l'océan ouvert où l'analyse peut plus raisonnablement être restreinte à un (notamment, la température) ou deux facteurs de changements climatiques. Cette approche est décrite pour les ressources halieutiques du Golfe du Lion dans le texte 4.3. En revanche, sur le littoral, et notamment pour les écosystèmes aquatiques peu profondes (baies, lagunes, estuaires et zones humides dans les deltas), l'impact des changements climatiques se traduit par une multitude de facteurs à prendre en compte (Pörtner et al., 2021). Les principaux facteurs, changement de la température, pression partielle du CO₂ et montée du niveau de la mer, interagissent de telle façon à influencer directement les écosystèmes par la destruction des habitats et indirectement sur la disponibilité de l'oxygène et la présence de composés réduits comme le sulfure d'hydrogène, l'ammonium et le manganèse dissout (texte 3.6). Ces trois composés sont toxiques pour beaucoup d'espèces végétales et animales. Ce phénomène sera particulièrement important pour les sédiments et impactera également la colonne d'eau lors des malaïgues (« mauvaise eaux » en occitan) (textes 3.5 et 3.6).

Par ailleurs, les changements climatiques impactent aussi le fonctionnement des bassins versants du littoral avec des impacts qui peuvent varier localement. Ainsi, une diminution de la pluviométrie pendant le printemps et l'été dans la région influera sur les flux des éléments nutritifs et par conséquent sur la composition du phytoplancton dans les lagunes (texte 3.4). Les impacts des changements climatiques sont en très forte interaction avec les autres pressions humaines, et dans la zone côtière ceci est particulièrement le cas pour l'eutrophisation.

Dans les quatre dernières décennies du XX^e siècle, beaucoup de lagunes côtières ont été dégradées par l'eutrophisation, ce qui s'est traduit par une perte des herbiers d'angiospermes marines (*Zostera noltei*, *Zostera marina*, *Ruppia spp.*) et des crises récurrentes de malaïgues. Les politiques publiques plus récentes d'assainissement des bassins versants ont néanmoins réussi à inverser la tendance (oligotrophisation) et plusieurs lagunes sont ac-

tuellement sur une trajectoire de reconquête du bon état écologique (Derolez et al., 2020a ; De Wit et al., 2020). **Cependant, les résultats positifs de ces politiques publiques risquent d'être contrecarrés par l'impact des changements climatiques (textes 3.4, 3.5 et 3.6) et par conséquent l'effort de lutte contre l'eutrophisation doit encore être renforcé.**

3.2 Le dioxyde de carbone (CO₂) et son impact sur la chimie de l'eau de mer

Rutger DE WIT (CNRS – MARBEC)

Le dioxyde de carbone (CO₂) tend à s'équilibrer entre l'atmosphère et l'océan et la proportion des émissions du CO₂ qui se dissout dans l'océan est estimée à environ 30 %. Dissout dans l'eau, le CO₂ forme l'acide carbonique (H₂CO₃), induisant une acidification du milieu. Ainsi le pH de l'eau océanique est passé de 8,2 avant la révolution industrielle à 8,1 actuellement. L'acide carbonique est un acide faible qui se dissocie en bicarbonate (HCO₃⁻) et carbonate (CO₃²⁻) selon le pH de l'eau de mer (figure 6.7). A l'avenir l'augmentation continue de la concentration du CO₂ engendrera ainsi une diminution du pH encore plus forte qui devrait se situer autour de 7,9 en 2100 (Zeebe et Wolf-Gladrow, 2001), avec paradoxalement comme conséquence une baisse de la concentration de carbonate (CO₃²⁻) qui va impacter négativement la calcification. On admet que ce phénomène se traduira par une baisse de la croissance des organismes marins doté d'un exosquelette calcaire, notamment les gastropodes et bivalves avec coquilles calcaires. **L'acidification engendrera ainsi des changements dans la composition des communautés marines favorisant les organismes non-calcaires aux dépens des organismes calcaires.**

La calcification dans l'eau contribue à son acidification (Zeebe et Wolf-Gladrow, 2001) et ne représente donc pas une solution miracle pour faciliter le stockage du CO₂, car en lieu de la ralentir ce processus accélère l'acidifi-

cation de l'océan. Par contre, la photosynthèse (fixation du CO₂ dans la biomasse) contribue à alcaliniser le milieu. De ce fait un moyen de stockage du CO₂ efficace avec des compensations possibles entre acidification et alcalinisation par la photosynthèse existe pour les algues calcaires (coralligènes) et les récifs de corail mais pas pour les huîtres, avec des impacts pour la conchyliculture (voir texte 4.1).

Bien que l'impact des émissions de CO₂ puisse être modélisé pour l'océan ouvert, son impact sur le pH des eaux côtières reste difficile à prédire, car il dépend fortement des conditions locales (Duarte et al., 2013). En effet le métabolisme très actif des eaux côtières conduit ces milieux à être selon les cas sursaturés ou sous-saturés en CO₂.

Par ailleurs, les équilibres acide-base dans la zone côtière sont fortement impactés par les apports des bassins versants, ainsi que par la géomorphologie du fait du rôle des sédiments dans les milieux peu profonds sur la chimie de l'eau, qui dans certains cas, comme pour l'étang de Thau pourrait contribuer à compenser l'effet acidification par la dissolution des carbonates sédimentaires. Dès lors les processus d'érosion côtière étudiés précédemment (voir section 2.3.1) ont aussi un impact sur les caractéristiques des milieux côtiers.

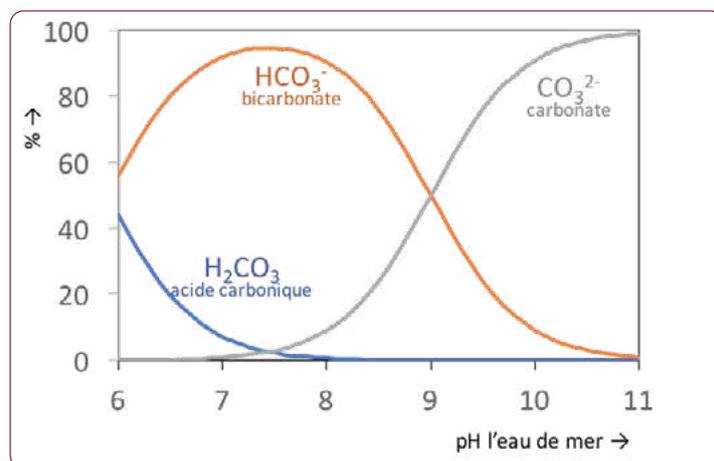


Figure 6.7. Equilibre des carbonates inorganiques dissous – proportion des trois différentes formes en fonction du pH dans l'eau de mer à 20 °C.
(Source : De Wit, 2021, pour le CROCC_2021)

3.3 Impact de l'augmentation de la température sur le fonctionnement des réseaux trophiques microbiens en zone côtière méditerranéenne

Francesca VIDUSSI (CNRS - MARBEC), Behzad MOSTAJIR (CNRS - MARBEC)

L'augmentation de la température de l'eau dans les zones côtières de l'Occitanie, en particulier les zones côtières les moins profondes et plus confinées telles que les écosystèmes lagunaires est désormais une tendance reconnue. En particulier, on observe une tendance à une augmentation de la température moyenne décennale, mais également des périodes plus au moins prolongées d'anomalies des températures saisonnières telles qu'observé dans la lagune de Thau pour certains hivers où la température peut atteindre 4-5 °C au-dessus de la moyenne hivernale habituelle (Trombetta et al., 2019).

Des observations et des expérimentations en mésocosmes (enceintes expérimentales étanches contenant plus de 2000 litres d'eau naturelle, **figure 6.8**) permettant d'étudier l'ensemble des organismes planctoniques dans des conditions au plus proche des conditions naturelles sont fondamentales pour élucider le fonctionnement des écosystèmes lagunaires et marins. Ces recherches ont mis en évidence la rapidité de réponse des communautés planctoniques à des augmentations de la température d'eau.

Notamment, **un changement des communautés planctoniques dans les eaux plus chaudes est observé et ces effets ne se restreignent pas à quelques espèces ou groupe d'organismes qui seraient plus sensibles à ces changements, mais se répercutent**

sur les différents niveaux trophiques affectant aussi bien la base du réseau trophique, les producteurs primaires, jusqu'en haut de la pyramide trophique, les prédateurs planctoniques (Trombetta et al., 2019 et 2020). Aussi bien les observations dans la lagune que les expérimentations en mésocosmes mettent en évidence la prédominance d'organismes plus petits due à l'augmentation de température, et une nette diminution des amplitudes des efflorescences phytoplanctoniques printanières.

Ces deux résultats sont d'une importance fondamentale : premièrement, la prédominance d'organismes plus petits diminue le passage de matière vers les organismes supérieurs (huitres et poissons) ; deuxièmement, la diminution de l'amplitude des efflorescences phytoplanctoniques printanières qui ont une importance fondamentale pour la productivité a des répercussions sur l'ensemble du fonctionnement des écosystèmes lagunaires.

Ces résultats mettent en exergue la réactivité et la fragilité de ces écosystèmes face à l'augmentation de la température et alertent sur la capacité future des écosystèmes lagunaires à maintenir les biens et services actuels, notamment en termes de productivité biologique dans un contexte de changement climatique et en particulier d'augmentation de la température des eaux.



Figure 6.8. Mésocosmes dans la lagune de Thau (plateforme MEDIMEER, OSU-OREME Sète).
(Source : photo B. Mostajir).

Ces enceintes expérimentales étanches contenant plus de 2000 litres d'eau chacune, elles sont immergées dans l'eau de la lagune et permettent d'étudier l'effet des forçages climatiques tels que l'augmentation de la température sur l'ensemble des organismes planctoniques dans des conditions au plus proche des conditions naturelles.



Figure 6.9. Photographie du canal de Sète en plein épisode d'eaux vertes à *Picochlorum* sp., 19 janvier 2019
(Source : crédit photo : Franck Lagarde, MARBEC, IFREMER)

3.4 Impact du changement climatique sur le phytoplancton des lagunes côtières méditerranéennes

Béatrice BEC (UM - MARBEC), Ariane ATTEIA (CNRS - MARBEC*), Angélique GOBET (IFREMER - MARBEC), Valérie DEROLEZ (IFREMER - MARBEC), Marion RICHARD (IFREMER - MARBEC), Franck LAGARDE (IFREMER - MARBEC)

En milieu lagunaire, la croissance du phytoplancton (les algues microscopiques vivant dans la colonne d'eau) s'appuie à la fois sur les apports nutritifs externes rythmés par les pluies sur le bassin versant et sur les apports nutritifs internes recyclés au sein même de l'écosystème, au niveau des sédiments et par l'excrétion des huîtres ou leur dégradation lors de mortalités dans les zones conchylicoles. Au sein du phytoplancton, on différencie trois composantes en fonction de la taille : le picophytoplancton de petite taille (inférieure à 3 µm), le nanophytoplancton de taille intermédiaire (entre 3 et 20 µm) et le microphytoplancton de plus grande taille (supérieur à 20 µm). Le pico- et le nano-phytoplancton répondent préférentiellement aux apports faibles et constants provenant des sédiments alors que les diatomées de grande taille (*Chaetoceros*, *Skeletonema*) répondent plus favorablement aux apports du bassin versant (Bec et al., 2005). Sur la façade méditerranéenne française, le changement climatique se traduit par une tendance à l'augmentation de la température de l'eau en milieu lagunaire (de +1,6 °C sur 20 ans entre 2000 à 2019 pour la lagune de Thau) et par une tendance à la diminution des précipitations (Lagarde et al., 2021). Il entraîne également des événements météorologiques extrêmes tels que des pluies intenses (orages printaniers, épisodes méditerranéens automnaux), et des canicules estivales pouvant aboutir à des crises anoxiques (ou « malaïgue ») résultant de la déplétion de la teneur en oxygène dissous dans l'eau.

En milieu lagunaire, cette variabilité climatique peut entraîner une diminution des apports nutritifs du bassin versant (induite par la diminution des pluies) ou favoriser un accroissement des apports nutritifs provenant des sédiments (par l'augmentation de la température). En modifiant les sources et les quantités des apports nutritifs disponibles dans la colonne d'eau, en particulier de l'azote et du phosphore, ces perturbations climatiques peuvent impacter les communautés phytoplanctoniques en modifiant leur saisonnalité, leur composition, ou leur abondance. De plus, l'augmentation de la température a pour effet d'accélérer la croissance de certaines espèces phytoplanctoniques et de favoriser le phytoplancton de petite taille (Bec et al., 2005, Trombetta et al., 2019) au détriment des diatomées qui soutiennent généralement la productivité conchylicole en milieu lagunaire. Dans la lagune de Thau, les étés caniculaires (2003, 2006, 2018 et 2019) ont favorisé le développement de picocyanobactéries de très petite taille (inférieure à 1 µm) (Collos et al., 2009, Derolez et al., 2020b). Une étude récente sur l'évolution des successions saisonnières des communautés phytoplanctoniques entre 1998 et 2017 dans la lagune de Thau a également montré un décalage de 4 semaines dans la saisonnalité des diatomées (Prigent 2020). La diatomée *Skeletonema* semble être la plus impactée par des changements de saisonnalité, avec une

diminution des amplitudes d'abondance et des efflorescences plus précoces (figure 6.9).

Au niveau du territoire national, l'année 2018 a été qualifiée à la fois d'année pluvieuse (le cumul pluviométrique annuel de 843 mm est le plus important des 20 dernières années) et d'année chaude (la température moyenne annuelle de 13,9 °C a dépassé la normale de 1,4 °C, plaçant l'année 2018 au premier rang des années les plus chaudes depuis le début du XX^e siècle, Météo-France). Dans la lagune de Thau, les perturbations climatiques observées en 2018 ont provoqué une cascade d'effets écologiques aboutissant à une malaïgue au cours de l'été puis à un phénomène d'eaux vertes observé au cours de l'automne et de l'hiver (Lagarde et al., 2021). Ces deux événements écologiques ont engendré des changements de la composition, de la diversité et des abondances des communautés phytoplanctoniques. Ainsi, la malaïgue a conduit à une efflorescence majeure de *Cylindrotheca* (Diatomée) puis à un bouleversement de la composition des communautés phytoplanctoniques en réduisant fortement la diversité des espèces présentes, en particulier au sein du microphytoplancton. A l'automne, le phénomène d'eaux vertes inédit dans la lagune résulte du développement d'une algue de petite taille (< 3 µm) appartenant au genre *Picochlorum*. Une telle efflorescence phytoplanctonique avec une densité particulièrement élevée n'avait jamais été observée dans la lagune depuis la mise en place des réseaux de surveillance dans les années 1990, ni en termes de biomasses ni en termes d'abondance qui expriment ici respectivement le poids et le nombre des algues en suspension rapporté par rapport au volume. Au cours de cette efflorescence automnale, un effondrement des abondances et de la diversité des diatomées a été observé. Ces perturbations écologiques ont perduré pendant près d'un an après la malaïgue de l'été 2018. L'efflorescence de *Picochlorum* a également eu des impacts socio-économiques majeurs, en réduisant drastiquement la productivité ostréicole. En effet, les huîtres n'ont pas la capacité de filtrer *Picochlorum* (compte tenu de sa petite taille) pour s'en nourrir. Cette efflorescence a donc causé un arrêt de croissance et des mortalités importantes chez les huîtres.

Situé à la base de la chaîne alimentaire, le phytoplancton joue un rôle important dans le maintien de la productivité conchylicole, activité économique majeure du littoral occitan. **Dans le contexte actuel des changements globaux, des modifications dans la composition, la biomasse et les successions saisonnières des communautés phytoplanctoniques sont déjà amorcées dans les lagunes méditerranéennes et pourraient impacter durablement leur fonctionnement et par conséquent les usages qui en dépendent.**

3.5 Changements climatiques et risque d'asphyxie des environnements aquatiques côtiers

Sylvain RIGAUD (UN - CHROME), Valérie DEROLEZ (IFREMER - MARBEC), Marion RICHARD (IFREMER - MARBEC)

L'oxygène est indispensable à la vie dans les écosystèmes aquatiques. Ses concentrations dissoutes dans l'eau sont la résultante d'un complexe équilibre entre d'un côté, son apport par échange avec l'atmosphère et par l'activité photosynthétique des végétaux (macrophytes et phytoplancton) et d'un autre côté, sa consommation par respiration biologique (animale, végétale et microbienne) et par des réactions chimiques d'oxydation. Dans une eau de mer à l'équilibre avec l'atmosphère les concentrations en oxygène sont de 7,4 mg/L à 20 °C. Lorsque les taux de consommation excèdent les apports en oxygène, les concentrations tendent à diminuer. Les organismes marins sont plus ou moins sensibles à ces réductions de concentrations en oxygène selon leur capacité de mobilité, leur physiologie, leur relation avec le sédiment et la façon dont ils se nourrissent (régime trophique) (p. ex : Riedel et al., 2012 ; figure 6.10). Passé sous le seuil des 5 mg/L, certaines espèces subissent déjà un stress biologique. A partir de 2 mg/L, le milieu passe en conditions hypoxiques, et les espèces les plus sensibles meurent. Si les conditions se dégradent encore, la disparition complète de l'oxygène conduit à l'anoxie et à la mort de tous les organismes macroscopiques, au relargage de sulfures d'hydrogène (H_2S) et à la prolifération de bactéries anaérobies. Ces phénomènes d'asphyxie entraînent la formation de « zones mortes » qui ont des impacts écologiques et socioéconomiques considérables.

Les situations hypoxiques et anoxiques peuvent se rencontrer naturellement dans les zones côtières fermées, faiblement renouvelées et/ou fortement productives. Cependant, au cours du dernier siècle, le nombre de sites côtiers impactés par ces phénomènes a doublé chaque décennie pour atteindre plus de 500 sites à l'échelle globale (Breitburg et al., 2018). L'ensemble des prédictions s'accordent pour dire que ces augmentations vont se maintenir dans le futur sous l'effet des forçages anthropiques et hydroclimatiques. Si l'eutrophisation des écosystèmes côtiers, associée à des apports excessifs

en nutriments (azote et phosphore principalement), apparaît comme la première cause de ces phénomènes de désoxygénation en zones côtières, les changements climatiques contribuent à l'augmentation de leur étendue, durée et amplitude (Isensee et al., 2015). La cause la plus directe est associée à l'augmentation des températures qui limite de la solubilité de l'oxygène et donc la quantité totale d'oxygène disponible pour les écosystèmes. Par exemple, **l'augmentation prévue de 3,75 °C des températures en 2100 en Occitanie générera une diminution relative de 7,1 % des concentrations en oxygène dissous**. Des températures plus chaudes favoriseront la consommation d'oxygène par la respiration. La diminution probable de la fréquence des épisodes de vent en période estivale limitera le brassage de la colonne d'eau et donc sa réoxygénation, pendant la saison où les concentrations en oxygène seront minimales et ses consommations maximales. Enfin, la modification de la pluviométrie et des apports d'eau douce (et nutriments) par les bassins versants aura des conséquences sur le renouvellement des eaux, la stratification de la colonne d'eau et ses échanges avec l'atmosphère ainsi que la productivité de ces écosystèmes côtiers, pouvant favoriser dans certains cas les phénomènes de désoxygénation.

A l'échelle de l'Occitanie, les phénomènes d'anoxie, appelées localement malaïgues, sont observés notamment pendant la période estivale. Si l'occurrence de ces malaïgues tend à diminuer en lien avec l'oligotrophisation (diminution du phénomène d'eutrophisation) des lagunes méditerranéennes, associée à la réduction des apports en nutriments par des politiques de gestions mises en place ces dernières années, des conditions hydroclimatiques - de moins en moins - exceptionnelles (canicule, absence de vent) tendront, au contraire, à favoriser leur apparition. La dernière importante malaïgue date de l'été 2018 et a impacté de nombreuses lagunes méditerranéennes.

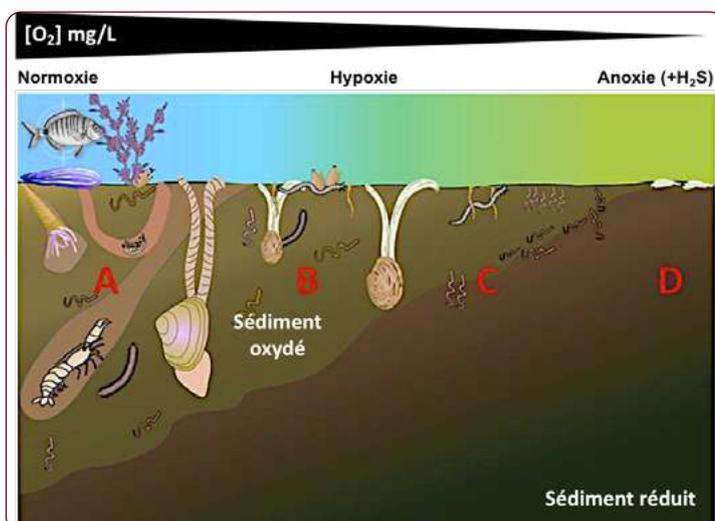


Figure 6.10. Modèle général de la distribution des animaux dans les sédiments des lagunes côtières selon un gradient de concentration d'oxygène dans l'eau surnageante.

(Source : modifié d'après Sutula et al., 2014 basé sur le modèle d'origine de Pearson et Rosenberg, 1978)

Elle s'est traduite notamment par des mortalités exceptionnelles de la totalité des moules et de 30 à 60 % des huitres en exploitation dans l'étang de Thau, pour une perte estimée à 5,9 millions d'euros. Une étude récente sur l'historique des malaïgues dans l'étang de Thau depuis 1970 montre qu'une augmentation de 1 °C de la température estivale multiplie par 3 le risque de déclenchement de ces crises (Derolez et al., 2020a). La dégradation massive des chairs des organismes morts, ainsi que les modifications des réactions biogéochimiques



Figure 6.11. Suivi en plongée de la mortalité des huitres durant une expérimentation d'anoxie (Projet ANOXIMO), réalisée à l'aide d'un mésocosme déployé dans la lagune de Thau.
(Source : crédit photo : N. Cimiterra, MARBEC, Ifremer)

dans les sédiments de surface (section 3.6), ont probablement entraîné le relargage de nutriments (et potentiellement de polluants, (section 3.6) dans la colonne d'eau, ce qui pourrait expliquer en partie le phénomène d'eaux vertes, ayant succédé à la malaïgue dans la lagune de Thau (Lagarde et al. 2021).

Des recherches sont actuellement en cours au niveau de la lagune de Thau pour essayer de mieux comprendre les conséquences des anoxies sur les fonctionnements écologiques et biogéochimiques dans ces environnements. Ainsi des suivis *in situ* haute fréquence ont été initiés pour mieux comprendre les variations temporelles de l'oxygène à différentes échelles de temps (horaire, saisonnière, pluri-annuelle) dans ces lagunes, dans l'idée de pouvoir anticiper les crises. Le développement et l'utilisation d'outils innovants et la mise en place d'expérimentations (figure 6.11) permettront d'analyser l'effet de l'anoxie et des mortalités sur les organismes planctoniques, les flux biogéochimiques et les relargages de métaux et de contaminants.

Les perspectives de ces travaux sont de quantifier l'impact des forçages climatiques sur la désoxygénation actuelle et future des lagunes méditerranéennes d'Occitanie. A terme, ces travaux devraient permettre le développement de modèles hydro-biogéochimiques capables de prédire l'évolution des écosystèmes côtiers selon différents scénarios hydroclimatiques et de gestion (p. ex : apports en nutriments, conchyliculture). Ces modèles serviront d'outils d'aide à la décision pour les gestionnaires, afin d'adapter les modes de gestion de ces environnements, et tenter de limiter l'occurrence de ces phénomènes de désoxygénation au cours des prochaines décennies.

3.6 Les sédiments des lagunes méditerranéennes : une bombe à retardement à détonateur climatique ?

Sylvain RIGAUD (UN - CHROME), Julie REGIS (UN - CHROME), Rutger DE WIT (CNRS - MARBEC)

Les sédiments de surface sont des zones où se déroulent d'importantes réactions biogéochimiques de la minéralisation de la matière organique. Entre autres, ils représentent une source interne d'éléments nutritifs pour le phytoplancton par le relargage vers la colonne d'eau du phosphore et de l'azote, principalement sous forme d'ammonium (NH_4^+ , voir aussi impact sur le phytoplancton, texte 3.4). L'oxygène est le premier réactif prenant part aux réactions de la minéralisation de la matière organique. Cependant, le transport d'oxygène de la colonne d'eau vers la profondeur du sédiment ne suffit pas pour pallier à sa demande par les micro-organismes aérobies. Par conséquent, à une certaine profondeur les sédiments sont anoxiques et la matière organique y est minéralisée par des microorganismes anaérobies. Dans les sédiments marins et côtiers, ce métabolisme anaérobie dépend principalement des bactéries sulfato-réductrices

qui convertissent les sulfates dissous dans l'eau de mer en sulfure. Ce sulfure, peut s'accumuler ainsi dans les eaux interstitielles du sédiment et diffuser vers la surface du sédiment. Or, dans un écosystème côtier en bon état, les sulfures sont oxydés par les bactéries sulfo-oxydantes dans la couche oxygène de surface du sédiment, ce qui évite ainsi leur transfert vers la colonne d'eau.

Le sulfure est hautement toxique pour la plupart des plantes et animaux, donc notamment pour les angiospermes marines avec leurs racines qui plongent dans la partie anoxique du sédiment. Cependant, ces plantes ont mis en place une stratégie de protection en assurant un transport de l'oxygène par leurs racines jusque dans la rhizosphère (partie des sédiments pénétrée par les racines), permettant ainsi d'éviter l'exposition des plantes aux sulfures.

La zostère naine (*Zostera noltei*) bénéficie également d'un système de protection par un réseau d'interactions mutualistes avec les bivalves du genre *Loripes* (famille *Lucinidae*), qui hébergent des bactéries sulfo-oxydantes (figure 6.12) et qui protègent la plante ainsi contre l'intrusion par le sulfure (Van Der Geest et al., 2020).

L'augmentation de la température réduit la solubilité de l'oxygène dans l'eau (voir texte 3.5), stimule la respiration aérobie et plus particulièrement la sulfatoréduction dans les sédiments (Sanz-Lázaro et al., 2011). Le changement climatique favorise ainsi la production de sulfure d'hydrogène dans le sédiment et ce phénomène est renforcé dans un contexte d'eutrophisation. Dans ces conditions le réseau des interactions mutualistes (figure 6.12) se détruit (Van Der Geest et al., 2020) et par conséquent les plantes subissent l'intrusion de sulfures toxiques dans leurs tissus causant ainsi leur mortalité. En général, la diminution de l'oxygène dans le sédiment et l'augmentation des concentrations de sulfure ont aussi un impact négatif sur l'ensemble de la faune du sédiment qui s'appauvrit en nombre d'espèces avec l'intensité de ce phénomène (Pearson et Rosenberg, 1978 ; figure 6.10).

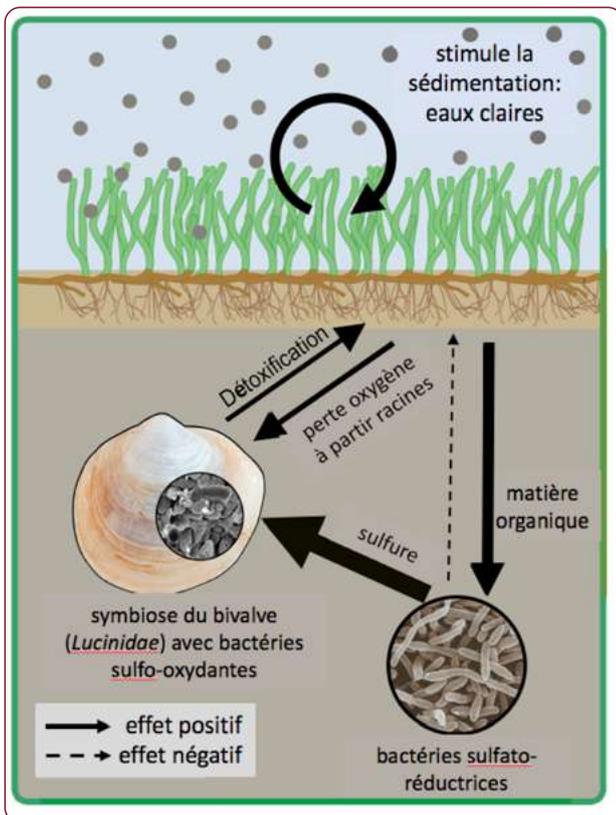


Figure 6.12. Schéma des interactions écologiques et biogéochimiques au sein d'un sédiment d'un herbier de zostères naines (*Zostera noltei*).

(Source : modifié d'après Matthijs Van der Geest, MARBEC).

La production de sulfure d'hydrogène (H_2S) par les bactéries sulfato-réductrices a potentiellement un impact négatif sur les plantes. Cependant, dans un écosystème en bon état une grande partie de ce sulfure est intercepté par les bivalves de la famille *Lucinidae* où il est détoxifié par leurs symbiotes (bactéries sulfo-oxydantes).

Ceci introduit une rétroaction qui aggrave le problème, car l'activité des animaux contribue également à introduire de l'oxygène dans le sédiment par le processus de bioturbation (Bianchi et al., 2021). **Les changements climatiques ont donc un impact très négatif sur la flore et la faune du sédiment avec comme rétroaction une diminution de la bioturbation et des impacts négatifs sur les processus biogéochimiques dans le sédiment (Bianchi et al., 2021). Une fois que les sédiments sont totalement anoxiques jusqu'en surface, ils favorisent le relargage de sulfure dans la colonne d'eau avec d'autres composés réduits (notamment le manganèse Mn^{2+}), ce qui peut induire le départ d'une malaïgue dans la colonne d'eau.** Encore une fois, ce processus de dégradation est aggravé dans un contexte d'eutrophisation.

Les lagunes méditerranéennes ont reçu au cours du siècle dernier d'importants apports en polluants (nutriments en excès, métaux, hydrocarbures, pesticides...) issus des activités anthropiques localisées sur leurs bassins versants. Si les réglementations mises en place à partir des années 1970-1980 ont permis de diminuer ces apports, les polluants n'ont pas disparu et sont aujourd'hui stockés en grande partie dans les sédiments. A ces stocks historiques s'ajoutent aujourd'hui des polluants émergents (plastiques, pharmaceutiques...). Or la diminution observée et prédite des concentrations en oxygène dans la colonne d'eau des zones côtières laisse présager une modification des caractéristiques chimiques de ces polluants dans les sédiments (réaction de réduction et désorption des contaminants adsorbés aux particules sédimentaires) avec dans certains cas la remobilisation de ces polluants dans la colonne d'eau. **Les expérimentations conduites ces dernières années montrent en effet que la diminution des conditions d'oxygénation favorise le relargage des nutriments et de certains métaux pouvant dégrader la qualité des eaux, participer à la persistance et intensification des phénomènes d'eutrophisation et donc d'hypoxie, et finalement s'opposer aux efforts mis en œuvre pour restaurer ces environnements aquatiques.** Les changements climatiques, en remobilisant les polluants stockés dans les sédiments, vont donc peut-être orienter les lagunes méditerranéennes vers des trajectoires écologiques non désirées que seuls des travaux multidisciplinaires intégrant la chimie, la biodiversité et le fonctionnement biogéochimique permettront de comprendre, prédire et peut-être limiter.

4. LES CONSÉQUENCES DE L'ÉVOLUTION DES MILIEUX SUR LES ACTIVITÉS MARINES

Introduction

Hélène REY-VALETTE (UM - CEE-M)

Comme noté précédemment (**section 3**), la hausse des températures et la modification des régimes pluviométriques peuvent modifier le fonctionnement écologique des milieux marins et des lagunes occitanes et impacter ainsi les activités liées aux ressources marines associées, à savoir la conchyliculture (concentrée dans les lagunes du fait des prédatons par les daurades qui interviennent en mer ouverte) et la pêche, qui se décline en Occitanie à travers plusieurs segments de petits métiers, chalutiers et thoniers. Ces secteurs génèrent des filières amont et aval importantes pour l'économie locale et s'avèrent très vulnérables aux effets du changement climatique sur la température et la pluviométrie (avec des conséquences en termes de salinité et d'acidification).

Dès lors des politiques d'adaptation devront être trouvées en collaboration entre scientifiques et professionnels pour renforcer à moyen terme la résilience de ces écosystèmes et des filières économiques et faciliter la gestion des crises, notamment par des suivis environnementaux à haute-fréquence. On peut citer ainsi pour la conchyliculture des modifications des pratiques culturelles, des sélections de souches adaptées, et une meilleure connaissance et maîtrise des cycles biologiques incluant stades larvaires et recrutement des juvéniles, des tables d'élevage connectées incluant exondation et oxygénation ou encore des systèmes de protection contre les prédateurs.

4.1 Impacts du changement climatique sur les cultures marines

Valérie DEROLEZ (IFREMER - MARBEC), Franck LAGARDE (IFREMER - MARBEC), Béatrice BEC (UM - MARBEC), Marion RICHARD (IFREMER - MARBEC), Marie-Agnès TRAVERS (IHPE)

Les lagunes méditerranéennes font l'objet d'usages traditionnels tels que la conchyliculture. La production conchylicole issue des lagunes occitanes représente annuellement entre 5000 et 8000 tonnes d'huîtres et entre 2000 et 4000 tonnes de moules, dont 90 % proviennent de la lagune de Thau. En Occitanie, cette activité permet l'emploi de 1200 permanents et 500 saisonniers et génère un chiffre d'affaires estimé à 75 millions d'euros en 2016.

En premier lieu, l'augmentation de la température peut conduire à un dépassement des limites physiologiques tolérables pour les coquillages en élevage. Ainsi, une hausse de 1,6 °C de la température moyenne annuelle de l'eau a été mise en évidence ces deux dernières décennies en lagune de Thau, accompagnée de températures estivales excédant parfois pendant plusieurs jours consécutifs le seuil léthal pour les moules (température > 27,5 °C) (Lagarde et al., 2021). Les températures estivales plus chaudes peuvent engendrer un risque accru de crise anoxique ou « malaïgue », phénomène de dégradation du milieu aquatique entraînant la disparition complète de l'oxygène et la mort des organismes aquatiques, dont les coquillages en élevage.

Une étude récente sur Thau a montré qu'une hausse de 1 °C de la température estivale pourrait multiplier le risque de malaïgue par 3 (Derolez et al., 2020a), mettant ainsi en cause les efforts d'assainissement menés depuis plusieurs décennies pour limiter l'eutrophisation (excès de nutriments) qui ont quant à eux permis de di-

viser par 6 le risque de malaïgue sur Thau par rapport aux années 1990 (Derolez et al., 2020a). Après douze années sans crise anoxique sur Thau, la canicule exceptionnelle de l'été 2018 a ainsi provoqué une malaïgue importante causant la mortalité de la totalité du stock de moules et de 30 à 60 % du stock d'huîtres (figure 6.13). La poursuite et l'amplification du réchauffement risquent en outre de favoriser le développement de certaines microalgues toxiques ou la prolifération d'organismes pathogènes pour les coquillages.

Des températures plus favorables à la bactérie pathogène *Vibrio aestuarianus* augmentent ainsi son impact sur les huîtres creuses adultes (Lupo et al., 2020) et peut générer des mortalités d'huîtres de taille commerciale de plus de 50 %. Enfin avec l'augmentation des températures de l'eau, il est également possible que de nouvelles espèces prédatrices de coquillages en élevage provenant d'Atlantique, ou surtout de la Mer Rouge et de l'Océan Indien, puissent migrer en Occitanie et s'y installer durablement.

Par ailleurs, une analyse sur la période 1994-2016 à Sète a mis en évidence un déficit pluviométrique depuis 2005 (Bec et al., 2018). La hausse des températures, associée à une baisse des cumuls pluviométriques, peut engendrer une hausse des niveaux de salinité, avec des impacts potentiellement négatifs sur la physiologie des huîtres, mais aussi sur le fonctionnement de la chaîne trophique, en particulier les communautés de phytoplancton.

Dans un contexte de changement climatique associé à la réduction des rejets de nutriments (phosphore et azote) d'origine urbaine - obtenue grâce aux travaux d'assainissement réalisés - une étude sur Thau a montré au cours des deux dernières décennies une diminution de près de 70 % des abondances de diatomées, microalgues importantes pour l'alimentation des coquillages (Derolez et

al., 2020b). Par ailleurs, suite à la malaïgue de l'été 2018, un bouleversement de la composition des communautés de phytoplancton a été observé pendant plusieurs mois et s'est caractérisé par un phénomène inédit de prolifération d'eaux vertes à Picochlorum, microalgue de très petite taille (< 3 µm) non filtrée par les huîtres en élevage et impactant leur croissance (Lagarde et al., 2021).

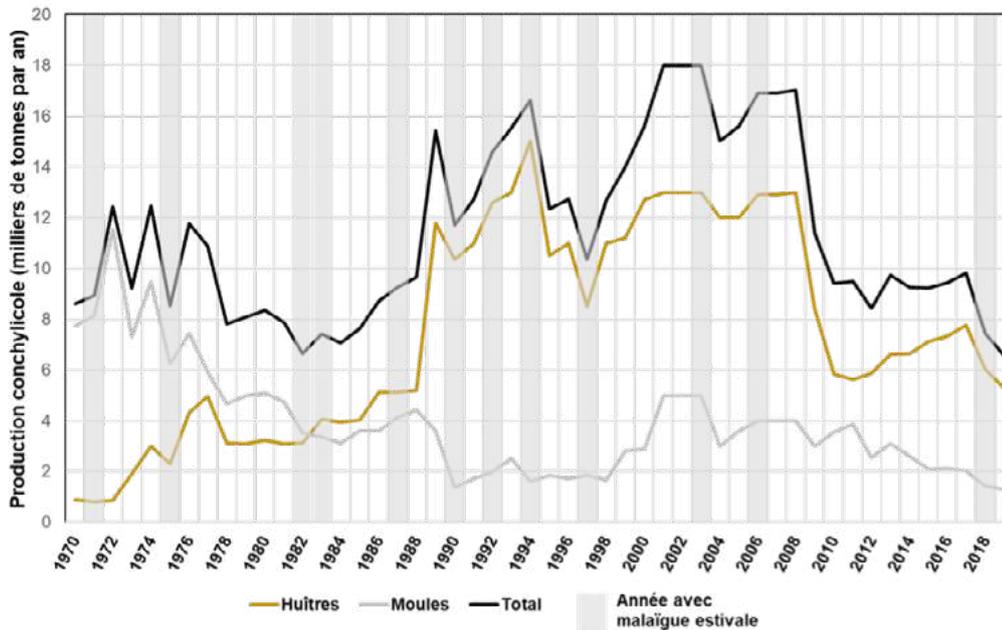


Figure 6.13. Production annuelle d'huîtres (courbe brune), de moules (courbe grise) et production conchylicole totale (courbe noire) en milliers de tonnes (t/an) de 1970 à 2019 ; occurrence des malaïgues estivales (bandes grises verticales) dans la lagune de Thau (Source : Derolez et al., 2020a complété avec les données de production de 2018, DML comm. pers.).

4.2 Impacts du changement climatique sur les ressources marines exploitées du Golfe du Lion

Jean-Marc FROMENTIN (IFREMER - MARBEC)

Le Golfe du Lion, à l'instar de la Méditerranée, se caractérise par une grande diversité d'espèces marines dont certaines, comme le thon rouge ou la sardine, sont exploitées depuis l'antiquité. Comme sur les autres façades maritimes françaises et européennes, la pêche en Méditerranée s'est fortement développée à partir de la seconde moitié du XIX^e siècle, avec notamment la motorisation des navires, conduisant à des situations de surpêche (Jackson et al., 2001). Tandis que la situation des pêcheries dans l'Atlantique nord ou le Pacifique nord s'est aujourd'hui nettement améliorée (Hilborn et al., 2020), les pêcheries méditerranéennes restent dans une situation difficile du fait de surpêche chronique (FAO, 2020) et de changements environnementaux, dont le réchauffement global (Marbà et al., 2015).

Sur le littoral méditerranéen français, l'une des espèces emblématiques exploitées est incontestablement le thon rouge (*Thunnus thynnus thynnus*). Cette espèce, fortement surexploitée des années 1990 à 2008, est maintenant reconstituée et exploitée durablement (ICCAT 2018), à la suite de la mise en place de mesures de gestion drastiques portant sur les quotas de pêche (fortement réduits dans les années 2010), la durée de la saison de pêche, la taille minimale de capture et des contrôles stricts à terre et en mer afin de limiter la pêche illégale

(Fromentin et al., 2014). Ce plan de gestion a permis de retrouver un stock comparable à celui des années 1970 plus rapidement qu'attendu par les scientifiques.

Ce redressement est pour partie dû aux effets du changement climatique, car la survie des œufs et des larves de thon rouge est fortement tributaire de la température qui doit être > 20 °C (Fromentin et Powers, 2005). Or le thon rouge se reproduit en Méditerranée de fin mai à début juillet, c'est-à-dire dans des eaux n'atteignant pas toujours ce minimum. Les années caniculaires, comme 2003, ont été marquées par de très bons recrutements du thon rouge (ICCAT, 2013), laissant penser que le réchauffement des eaux est bénéfique à la reproduction de cette espèce. La reconstitution rapide de ce stock pourrait donc résulter d'un effet synergique positif lié au plan de gestion et au réchauffement des eaux.

Cependant, le changement climatique semble avoir plus d'effets négatifs que positifs sur la biodiversité méditerranéenne et son exploitation. Tout d'abord par l'accélération des invasions d'espèces tropicales transitant par le canal de Suez et qui trouvent, en Méditerranée (côtes françaises incluses), un habitat devenu favorable avec le réchauffement.

Leur invasion produit dans certains cas des dégradations touchant fortement les relations trophiques, le fonctionnement et la productivité des écosystèmes, affectant ainsi aussi la durabilité de son exploitation. L'invasion des deux espèces de poisson lapin (*Siganus luridus* et *S. rivulatus*) impactent par exemple fortement la biomasse et la diversité des macroalgues et des invertébrés benthiques méditerranéens (Vergés et al., 2014), alors que les espèces invasives toxiques, comme la rascasse volante (*Pterois miles*) et le poisson ballon (*Lagocephalus sceleratus*), impactent directement (prédation) ou indirectement (compétition) des espèces natives à forte valeur marchande (Savva et al., 2020).

Par ailleurs, les sardines et l'anchois du Golfe du Lion, première ressource des pêcheries méditerranéennes françaises en volume depuis le XIX^e siècle, ont connu

une diminution forte de leur taille et de leur condition (taux de gras) depuis 2008, les rendant inexploitable faute de marché (Saraux et al., 2019). Différentes hypothèses ont été étudiées pour expliquer ce phénomène soudain, notamment la surpêche, la prédation naturelle due au thon rouge ou au dauphin, l'émigration ou les maladies épizootiques, mais toutes ont été réfutées (Saraux et al., 2019).

Actuellement, l'hypothèse principale est celle d'une évolution de la production planctonique au profit des espèces de plus petite taille et moins énergétique pour les poissons qui les consomment et qui pourrait résulter de changements environnementaux en liaison avec le réchauffement global et/ou des pollutions d'origine anthropique (Feuilletoy et al., 2020).

4.3 Impacts du changement climatique sur la biodiversité marine et les ressources halieutiques en mer Méditerranée

Fabien MOULLEC (NIOZ - DCS), Ignacio PITA (IRD - MARBEC)

Si la surexploitation des ressources a été l'un des principaux moteurs des changements biologiques observés en mer Méditerranée au cours des 70 dernières années, nul doute que le changement climatique constituera un des forçages majeurs de la dynamique des écosystèmes dans les prochaines décennies (Shin et al., 2019). L'ensemble des modifications physico-chimiques induites par le changement climatique conduit à un bouleversement des composantes biologiques des écosystèmes, de l'échelle individuelle à l'échelle écosystémique, des producteurs primaires (algues, phytoplancton) aux plus hauts niveaux trophiques (p. ex. poissons prédateurs) (Moullec et al., 2016 ; MedECC 2020). Avec l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre, notamment du CO₂, la température moyenne de l'eau a déjà augmenté de 1,5 °C par rapport à l'ère préindustrielle. Le pH, qui caractérise l'acidité des eaux, a diminué de 0,08 unité et le niveau de la mer a, quant à lui, augmenté de 6 cm en l'espace de 20 ans (MedECC 2020). Ces changements observés peuvent paraître faibles, ils sont en réalité considérables. La Méditerranée change plus vite et parfois plus fortement que le reste de l'océan mondial (Cramer et al., 2018).

Selon les derniers scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre, les eaux de surface devaient continuer à se réchauffer, de l'ordre de 1 à 4 °C au cours du XXI^e siècle. Dans ce contexte, des travaux de modélisation récents ont montré que la biomasse et les captures de poissons pourraient augmenter respectivement de 22 % et 7 % d'ici la fin du siècle à l'échelle du bassin méditerranéen (Moullec et al., 2019). Cette apparente bonne nouvelle cache en réalité une très forte disparité spatiale, la présence simultanée de grands gagnants et perdants parmi les espèces et les pêcheries ainsi que des remaniements importants au sein des assemblages d'espèces.

Il est, par exemple, anticipé une diminution jusqu'à 23 % des captures dans le bassin occidental (-17 % dans le Golfe du Lion). Les espèces gagnantes seraient des espèces de plus petite taille, situées plus bas dans la chaîne alimentaire, non-indigènes et à affinité pour des eaux plus chaudes, tandis que les espèces perdantes seraient caractérisées par des tailles plus importantes et ont actuellement une valeur commerciale plus importante (p. ex., la biomasse de merlu pourrait diminuer de 26 % d'ici la fin du siècle). En outre, près de la moitié de la surface de la Méditerranée devrait subir une diminution de la richesse en espèces et plus d'un tiers de la surface un remplacement total ou partiel des espèces existantes par de nouvelles (Moullec et al., en révision).

Dans ce contexte, **une diminution de la pression de pêche et/ou une amélioration de la sélectivité des pêcheries (un plus grand maillage des filets par exemple) pourrait partiellement inverser les tendances projetées en Méditerranée occidentale** (p. ex., une diminution théorique de 40 % de la pression de pêche dans le Golfe du Lion pourrait permettre une augmentation des captures totales de l'ordre de 10 % d'ici la fin du siècle) et augmenter la résilience des écosystèmes face au changement climatique (Moullec et al., en révision). En raison de grandes disparités socio-économiques au sein du bassin méditerranéen, tous les pays n'affichent pas la même vulnérabilité climatique. Les pêcheries méditerranéennes françaises capturent certes des espèces vulnérables au changement climatique (p. ex., anchois) mais, et contrairement à ces voisins du sud de la Méditerranée, le pays dispose d'une capacité d'adaptation plus importante d'un point de vue socio-économique et une dépendance moindre aux produits de la pêche comme sources de revenus et d'alimentation (figure 6.14).

Bien que des incertitudes demeurent quant à l'ampleur des modifications biologiques induites par le changement climatique, il y a urgence à agir. Il s'agit de mettre en œuvre une véritable gestion écosystémique des pêches à l'échelle du bassin méditerranéen, de protéger et conserver la biodiversité par la mise en place d'un ré-

seau d'aires marines protégées efficacement gérées et d'anticiper les changements pour adopter des stratégies d'adaptation cohérentes. Face à la crise climatique, réduire nos émissions de gaz à effet de serre reste l'un des principaux leviers d'action pour protéger les écosystèmes et les sociétés humaines qui en dépendent.

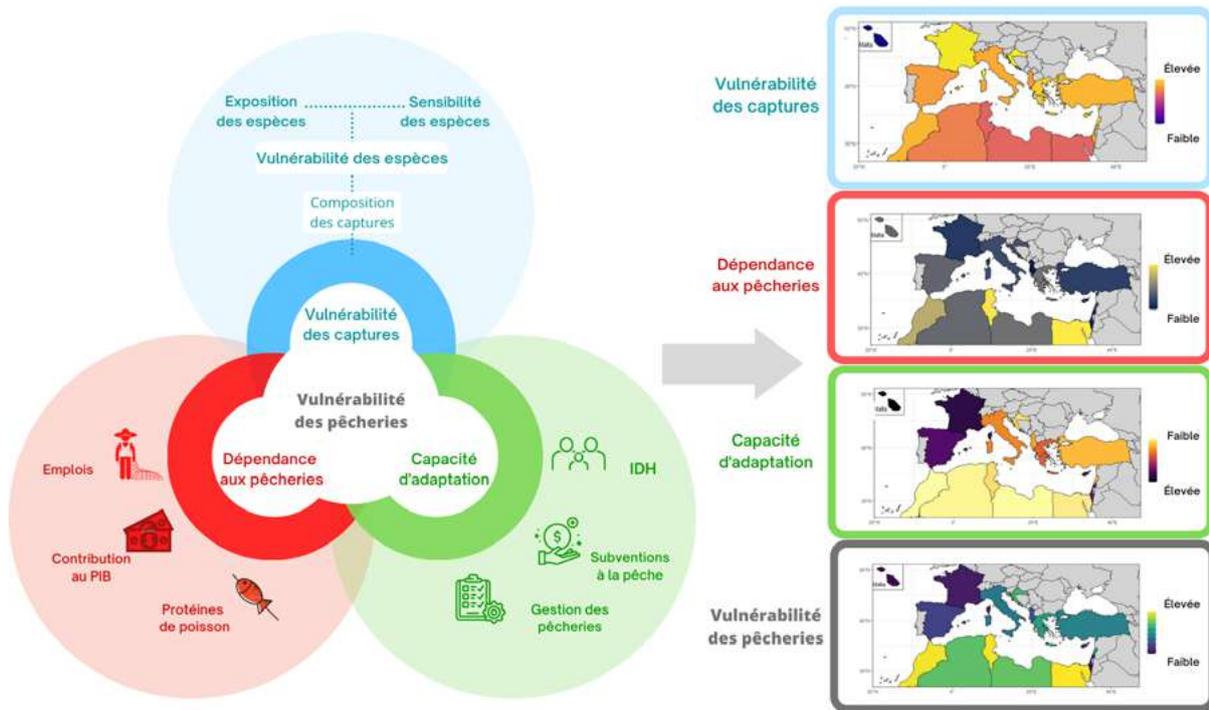


Figure 6.14. Sur la base de la méthodologie d'analyse de vulnérabilité au changement climatique développée par le GIEC, il est possible de calculer un indice de vulnérabilité des pêcheries au changement climatique. Cet indice considère trois composantes : la vulnérabilité des espèces face à des changements environnementaux (p. ex., la température de l'eau), les paramètres socio-économiques de dépendance aux pêcheries et la capacité d'adaptation de chaque pays. (IDH : Indice de Développement Humain, PIB : Produit Intérieur Brut). (Source : Pita et al., 2021).

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Bâtir une vision prospective et collective pour s'adapter à l'élévation du niveau de la mer (La Mer Monte) - 11

Parc Naturel Régional de la Narbonnaise - *En savoir plus*

Territoire littoral composé d'un front maritime de 42 km, riche de lagunes et de lidos, le Parc naturel régional de la Narbonnaise en Méditerranée, en partenariat avec la Région Occitanie, porte depuis 2018 le programme La Mer Monte dont l'objectif est de parler de l'élévation du niveau de la mer avec les élus et les habitants du territoire. Ce programme mêle études scientifiques et approches sensibles pour mieux connaître les phénomènes en jeu et leurs impacts sur le territoire, questionner la relation affective, intime et symbolique qu'ont les acteurs du territoire à la mer, agir sur la prise de conscience de l'enjeu et contribuer à la construction d'une vision prospective et collective pour engager un processus d'adaptation à l'élévation du niveau de la mer. La transversalité et la diversité des approches mises en œuvre font l'originalité de ce programme.



5. Faciliter le pilotage de l'adaptation et la prévision des événements extrêmes : les outils, capteurs et plateformes d'observation des océans et des littoraux

Catherine JEANDEL (CNRS – LEGOS), Pierre MAUREL (INRAE, TETIS)

La région Occitanie se caractérise par une recherche très active dans le domaine des dispositifs d'observation avec de nombreuses équipes impliquées dans les sciences de l'observation et de l'information qui s'intéressent au milieu marin. Il s'agit principalement des équipes suivantes : BRGM, CNES, ESPACE-DEV, GM, LA, LEGOS, LIRMM, L2C, Météo France, SHOM, TETIS.

L'identification et le suivi des changements dans les caractéristiques du milieu marin requièrent une surveillance de l'océan par des capteurs permettant de mesurer des paramètres essentiels comme la température (T) et la salinité (S) qui conditionnent la densité et donc la profondeur de circulation de l'eau, mais aussi la pression ou la teneur en chlorophylle (fluorescence) ou en particules (turbidité) ainsi que la « qualité » géochimique du milieu à travers la concentration en oxygène dissous, le pH, la pression partielle en gaz carbonique et certains sels nutritifs. De nombreuses recherches permettent de diversifier et perfectionner des capteurs pour mesurer ces éléments.

Ces capteurs peuvent être installés sur divers types de plateformes à des profondeurs assignées (navire océanographique, structures de mouillages, divers types de flotteurs, voire des animaux dotés de systèmes de balises) et avec des processus de collecte des informations directs (ordinateur de bord pour les navires) ou via des satellites. On note que l'association fréquente des capteurs *in situ* et des capteurs embarqués sur des satellites permet de renforcer la performance des mesures. Les recherches dans ce domaine visent à minimiser la taille des capteurs, l'énergie consommée et le coût tout en optimisant leurs performances de mesure avec notamment la volonté de privilégier un traitement intelligent du signal au sein du capteur pour réduire les flux de transfert de données. Par ailleurs, des travaux en termes d'imagerie *in situ* permettent aussi de caractériser la taille des particules de matière qui chutent vers les abysses (séquestrant le carbone) ou de reconnaître des espèces de zooplancton.

Par ailleurs, concernant les risques d'érosion et de submersion et la gestion des territoires côtiers, les observations satellitaires constituent aussi des sources de données précieuses pour la recherche et l'action publique relative à la surveillance des océans et la gestion des littoraux, comme l'illustrent les catalogues des deux pôles nationaux de données et de services [Odatis](#) (pour l'océan) et [Theia](#) (pour les surfaces continentales) au sein de l'Infrastructure de Recherche [DataTerra](#) (pour l'observation intégrée du système Terre). Différents paramètres océaniques peuvent être mesurés et cartographiés en utilisant et combinant les observations de satellites actifs et passifs (radiomètres, altimètres, scatteromètres, radars) : vents et vagues, salinité, température de surface...

Pour la gestion fine des territoires littoraux où se concentrent de nombreux enjeux qui s'amplifient avec le changement climatique, des images satellites optiques ou radars à haute répétitivité temporelle ou à très haute résolution spatiale permettent de suivre d'autres paramètres : occupation du sol, trait de côte, herbiers sur les estrans et dans les lagunes, humidité du sol.

Du fait du coût élevé des images commerciales à très haute résolution spatiale (Pléiades, SPOT 6-7, ...), des initiatives multi partenariales de mutualisation ont été mises en place en France pour l'acquisition et la diffusion de ces données, tel que le dispositif [Dinamis](#) (Dispositif Institutionnel National d'Approvisionnement Mutualisé en Imagerie Satellite) transversal à l'IR DataTerra.

Soulignons enfin que l'ensemble de ces dispositifs satellitaires et capteurs *in situ* génèrent des volumes considérables de données qui peuvent être aujourd'hui mieux exploités grâce à de nouvelles infrastructures de données et de services qui tirent parti des progrès en intelligence artificielle et en ressources informatiques (stockage massif, calcul intensif et distribué).



CHAPITRE

7

**MILIEUX
MONTAGNARDS**

Coordination et rédaction : Virginie HUGUES et Juan TERRADEZ

Ce chapitre a été rédigé en collaboration avec l'Observatoire Pyrénéen du Changement Climatique (OPCC) à partir des 10 défis majeurs identifiés dans son dernier rapport (« Le changement climatique dans les Pyrénées : impacts, vulnérabilités et adaptation »). Ces défis ont vocation à structurer la future Stratégie pyrénéenne d'adaptation au changement climatique (EPiCC) portée par l'OPCC en coopération transfrontalière avec les acteurs du territoire.

Relecture : Fabien AUBRET, Etienne BERTHIER, Gérard BRIANE, Sébastien CHAUVIN, Pierre CHEVALLIER, Raphaël DELPI, Eva GARCIA BALAGUER, Simon GASCOIN, Gaël LE ROUX, Samuel MORIN, Jean-Michel SOUBEYROUX.

Cartographie des milieux montagnards d'Occitanie : éléments de contexte et évolutions climatiques

Les milieux montagnards en Occitanie regroupent deux grands ensembles : 75 % du massif pyrénéen (montagnes, vallées et piémont : sud des Hautes-Pyrénées, Haute-Garonne et Ariège, sud de l'Aude et ouest des Pyrénées-Orientales) et 26 % du Massif central (monts et plateaux : Aveyron et Lozère, centre et nord du Lot, est du Tarn-et-Garonne et du Tarn, nord de l'Aude, de l'Hérault et du Gard). Le massif des Pyrénées est caractérisé par des paysages de montagnes (le long de la frontière franco-espagnole et sur les deux versants, le point culminant en France est le Vignemale, qui culmine à 3298 m d'altitude), et des paysages de piémont (plus au nord, côté français) (figure 7.1).

Dans le Massif central, l'altitude y est moins élevée (1699 m pour le point culminant, le Mont Lozère), l'activité la plus répandue est l'élevage et l'exploitation forestière et les industries agro-alimentaires y sont fortement représentées. A l'échelle de la région, six Parcs Naturels Régionaux (sur sept) et les deux Parcs Nationaux d'Occitanie (Cévennes et Pyrénées) sont situés en zone de montagne. Ces deux espaces représentent 55 % du territoire de la région et s'étalent sur 12 des 13 départements d'Occitanie, mais ne comptent que 20 % de la population, soit 1,2 millions d'habitants (Plan Montagnes 2018-2025).

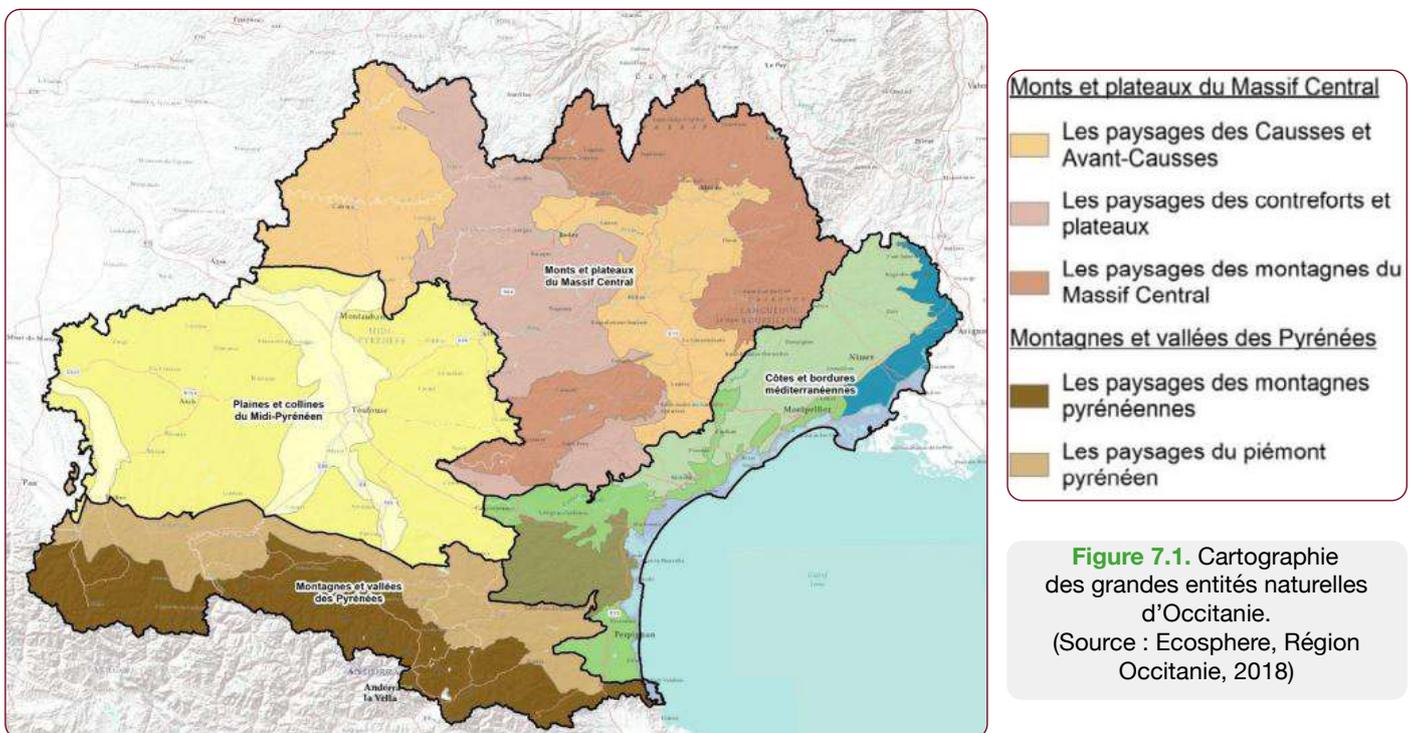


Figure 7.1. Cartographie des grandes entités naturelles d'Occitanie. (Source : Ecosphère, Région Occitanie, 2018)

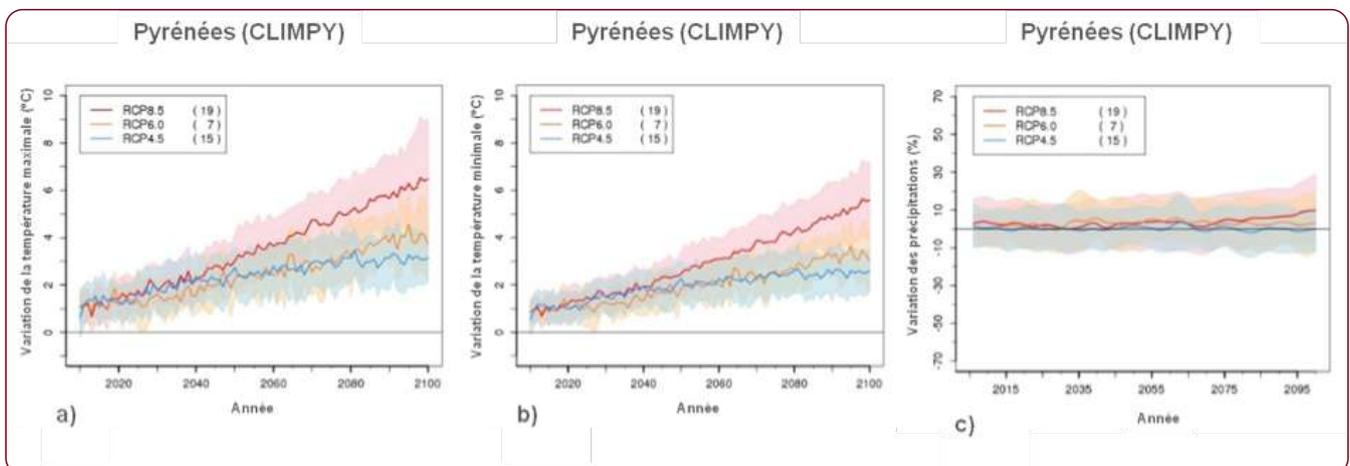


Figure 7.2. Évolution de l'anomalie moyenne annuelle de (a) température maximale, (b) température minimale et (c) précipitation moyenne pour les Pyrénées. Les écarts entre les projections de températures minimales et maximales selon les 3 scénarios RCP (Representative Common Pathway - scénarios de trajectoire du forçage radiatif jusqu'à l'horizon 2300 établis par le GIEC) analysés sont plus prononcés à la fin du siècle. (Source : Projet CLIMPY 2016-2019)

Les régions de montagne d'Occitanie s'inscrivent dans une dynamique climatique similaire aux autres milieux montagnards en France et dans le monde. Les tendances récentes observées sur les températures (figures 7.2 et 7.3), la pluviométrie (figure 7.2) et l'enneigement (figures 7.4 et 7.5), mais aussi la rapidité de ces changements ont déjà des conséquences directes et indirectes sur les écosystèmes des milieux montagnards et les activités et populations qui s'y trouvent.

Ces écosystèmes, du fait de leurs caractéristiques (altitude, climat spécifique, biodiversité endémique) sont particulièrement sensibles aux modifications du climat, dont certains effets sont déjà identifiés (quantité et saisonnalité des eaux de ruissellement, augmentation hivernale et diminution estivale des apports en eau, productivité des centrales hydroélectriques, fonte nivale précoce, impacts sur le tourisme et autres activités culturelles etc. (GIEC, 2019).

		2030		2050		2090	
	Autres RCP (2.6 ; 4.5 ; 6.0)	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	
T° min	Similaire	0,9 et 2,2°C	1,2 et 2,8°C	1,7 et 3,3°C	1,6 et 3,5°C	3,6 et 6°C	
T° max	Similaire	1 et 2,7°C	1,4 et 3,3°C	2 et 4°C	1,9 et 4,2°C	4,3 et 7,1°C	

Figure 7.3. Évolution des températures selon trois horizons temporels et selon les différents RCP, moyenne des différents modèles employés (19 et 15 modèles pour les RCP8.5 et 4.5 respectivement), d'après OPCC (2018). (Source : Projet CLIMPY 2016-2019).

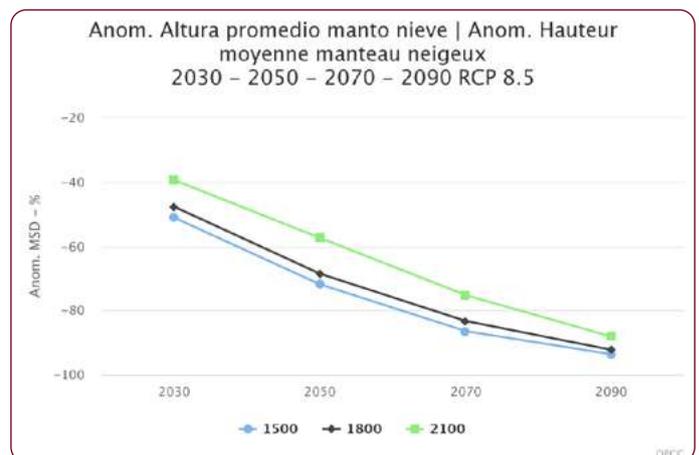
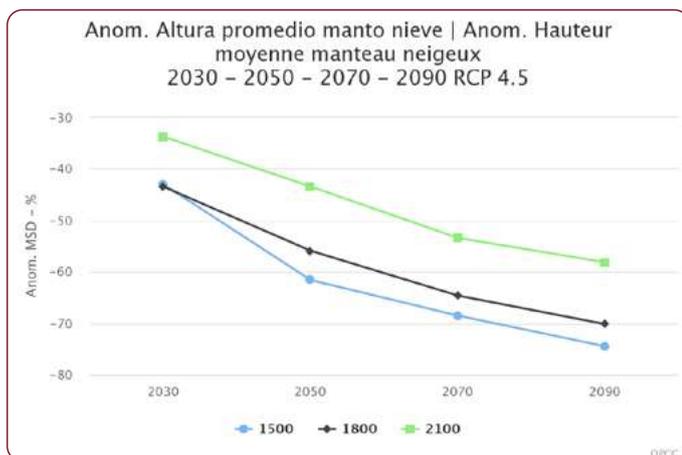
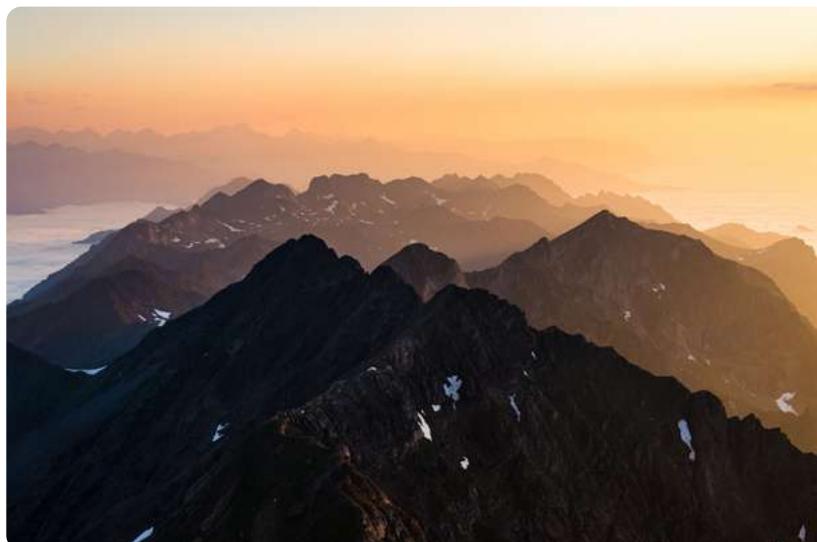


Figure 7.4. Évolution moyenne projetée de l'enneigement dans les Pyrénées orientales françaises, exprimée en % de diminution par rapport à la valeur moyenne de la période de référence 1986-2005 et en fonction de l'altitude. (Source : voir section analyse, [géoportail](#) OPCC 2021).



Crédit photo : pexels.com

Observations et projections climatiques dans les Pyrénées

A très haute altitude (au-delà de 1800 à 2000 m), la collecte de données devient difficile en raison du faible nombre de stations météorologiques. Malgré cela, on constate une hausse générale des températures et même si celle-ci n'a pas toujours été régulière (+1,2 °C entre 1959 et 2015 avec des années plus ou moins éloignées des moyennes), elle devrait se poursuivre d'ici la fin du siècle, de manière plus ou moins marquée selon les RCP envisagés (OPCC action climat, 2013).

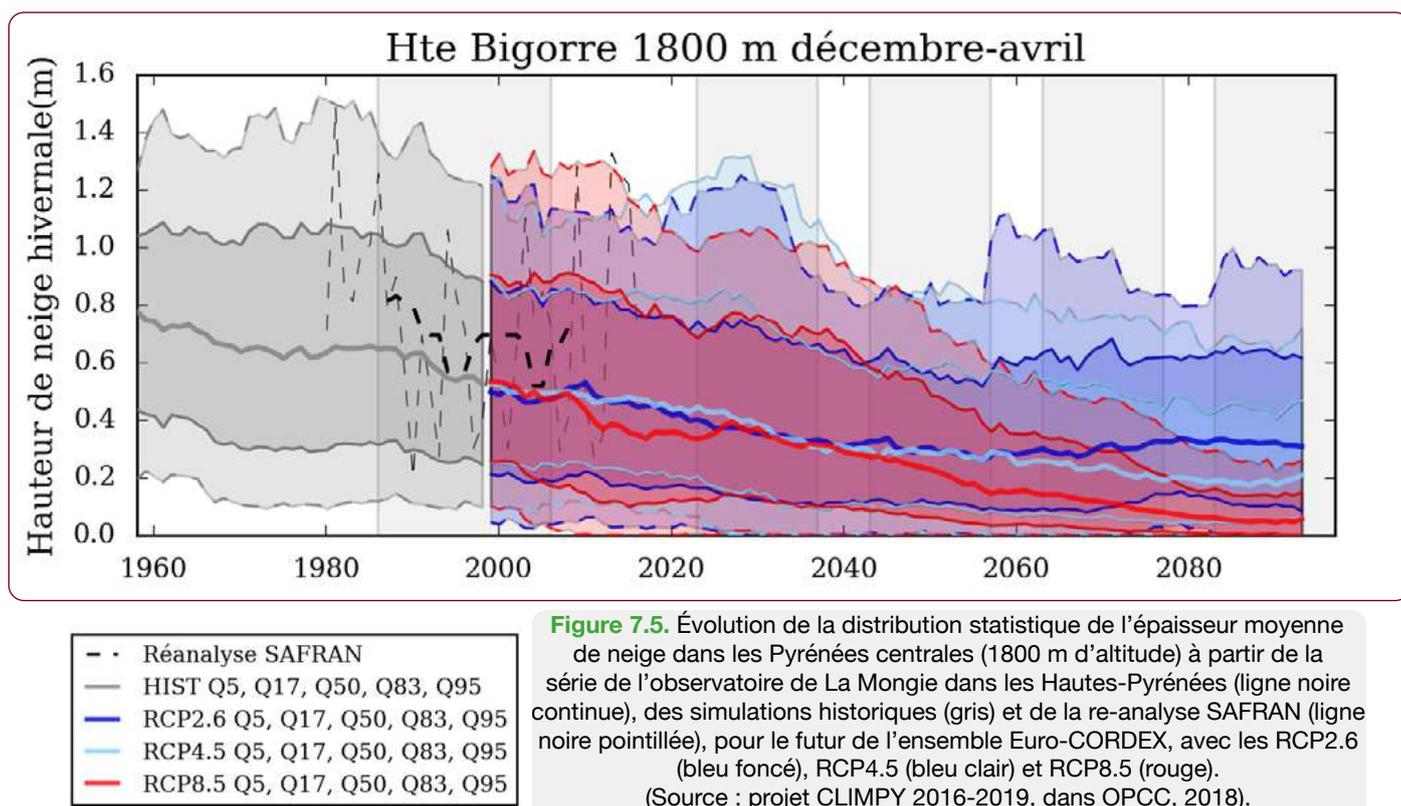
Selon les résultats de l'action climat du projet OPCC, l'analyse des données de 101 séries pour la période 1959-2010 montre que le volume des précipitations a quant à lui diminué de 2,5 % par décennie sur l'ensemble des Pyrénées. Les résultats du projet CLIMPY 2016-2019 ont permis d'étendre et d'homogénéiser 1328 séries de précipitations, prolongeant la base de données transfrontalière établie jusqu'en 2015. Les résultats de ce projet de coopération montrent que si, sur le versant sud des Pyrénées, cette réduction des précipitations moyennes a été de -3,5 % de 1950 à 2015, sur le versant nord, elle s'est maintenue à -0,5 % par décennie.

L'enneigement (figures 7.4 et 7.5) présente une baisse significative depuis 50 ans et notamment sur le versant sud, avec toutefois des niveaux contrastés entre la partie occidentale et la partie orientale où les tendances observées avec les mesures disponibles ne sont pas

statistiquement significatives (Projet CLIMPY 2016-2019). Dans les Pyrénées orientales et à l'horizon 2090 (figure 7.4), l'enneigement pourrait diminuer d'environ 60 à 80 % (RCP4.5) ; cette diminution pourrait atteindre 100 % dans le cas du scénario 8.5. Cependant, ces tendances se superposent à une variabilité interannuelle élevée, qui s'explique par les fortes oscillations des températures et des précipitations dans le temps.

En ce qui concerne les projections futures, l'épaisseur du manteau neigeux dans les Pyrénées centrales pourrait diminuer de moitié d'ici 2050 à 1800 m d'altitude, et la période de permanence de la neige au sol pourrait se réduire de plus d'un mois par an (entre l'automne et le printemps). L'ampleur du phénomène montre une forte variabilité interannuelle et varie également en fonction de l'altitude, même si la sensibilité augmente à partir de 2000 m. **Ce phénomène de réduction du manteau neigeux, en épaisseur et en durée, pourrait avoir des effets marqués sur les écosystèmes, le régime des cours d'eau et les activités socioéconomiques.**

Globalement, malgré un fort niveau d'incertitude quant aux projections climatiques d'ici la moitié et la fin du siècle (celles-ci dépendent des scénarios d'émissions envisagés et des actions qui seront mises en place), les analyses des données météorologiques et climatiques montrent une prédominance des années sèches et des quantités de précipitations inférieures à la normale.



Observations et projections climatiques dans le Massif central

Dans le sud du Massif central, les quatre massifs qui composent le Parc national des Cévennes (Mont Aigoual, Mont Lozère, Causse Méjean et vallées cévenoles) sont caractérisés par un climat très contrasté selon la période et le lieu considérés, en raison de leur localisation à la croisée de différentes influences climatiques (méditerranéenne, montagnarde et continentale).

Les observations climatiques réalisées depuis plusieurs décennies montrent une diminution des précipitations (entre -8 et -10 % à l'échelle du Parc, [GREC-Sud et RECO, 2020](#)) et du nombre de jours de pluie, un réchauf-

fement généralisé qui est plus important au printemps et s'accompagne d'une hausse du nombre de « nuits tropicales » (nuit dont la température minimale est supérieure ou égale à 20 °C, [Météo France](#)).

Ces « nuits tropicales » ont tendance à augmenter en basse altitude, notamment sur les sites de Mende (Lozère), Saint-Christol-lès-Alès (Gard) et Salindres (Gard). On constate également une hausse du nombre de jours très chauds (jour dont la température maximale est supérieure à 30 °C) (+49 jours/an à Salindres depuis 1959 ; [figure 7.6](#)).

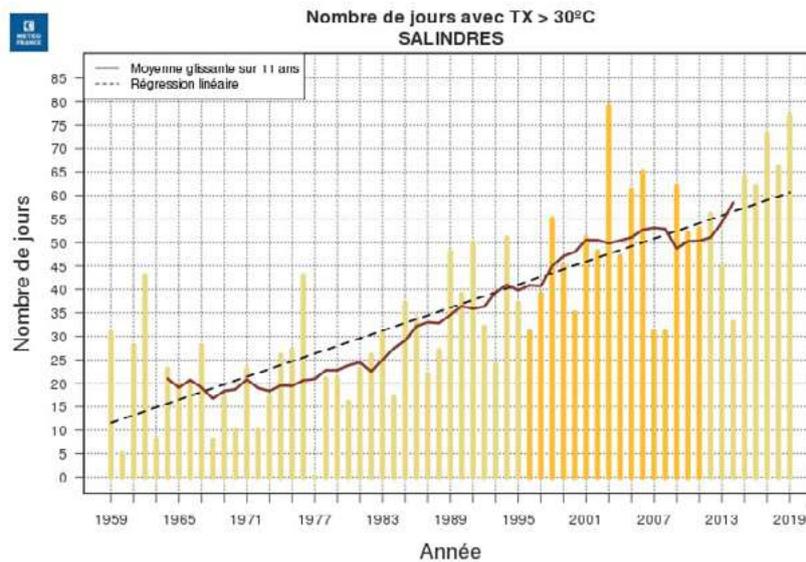


Figure 7.6. Nombre de jours très chauds (température maximale supérieure à 30 °C) à Salindres, Gard. (Source : Météo-France, dans [GREC-Sud et RECO, 2020](#)).

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Développer une approche sensible pour favoriser l'appropriation et l'acceptation des mesures d'adaptation (Cartes Blanches) - 65

Parc National des Pyrénées - [En savoir plus](#)

« Cartes Blanches » est un projet initié par le Parc national des Pyrénées avec l'objectif de contribuer à une meilleure prise de conscience des enjeux paysagers et climatiques par le grand public. En s'appuyant sur différents canaux, la perception des habitants et des visiteurs sur les évolutions paysagères et climatiques sera collectée en 2021 et utilisée en 2022 comme vecteur de sensibilisation. Le changement climatique est un sujet anxiogène, il est nécessaire d'adopter une démarche innovante de sensibilisation. C'est l'enjeu de Cartes Blanches qui s'appuie sur une approche sensible, pour permettre une prise de conscience et un passage à l'action. Le projet s'articule autour de quatre axes :

- la collecte de mémoire par une ethnologue ;
- la diffusion de cartes postales lors de spectacles de rue qui représentent des paysages anciens, actuels et futurs pour susciter l'expression des habitants ;
- l'organisation d'ateliers et interviews radiophoniques avec des experts locaux, des échanges intergénérationnels dans les écoles ;

- l'élaboration de spectacles de sensibilisation s'inspirant de la parole collectée.

L'enjeu final sera d'arriver à une bonne appropriation des problématiques liées au changement climatique pour faciliter l'acceptation de mesures d'adaptation dans les prochaines années et permettre une gouvernance des actions plus partagée.



Préparer les acteurs du territoire à faire face aux phénomènes climatiques extrêmes et récurrents

L'augmentation de l'occurrence et de l'intensité des événements climatiques extrêmes est constatée depuis plusieurs années dans le bassin méditerranéen. Malgré une forte variabilité en termes de niveau des précipitations et de récurrence du phénomène, l'analyse des épisodes méditerranéens montre une tendance à l'augmentation. Des facteurs tels qu'une mer Méditerranée plus chaude et des reliefs sur lesquels vient buter une masse d'air chaude favorisent l'apparition de pluies intenses, surtout à l'automne.

On observe que la fréquence du nombre d'épisodes méditerranéens où l'on dépasse les 200 mm en 24h a augmenté de 2,7 fois entre 1961 et 2015. Sur cette période, on obtient une augmentation de « +22 % sur les maxima annuels de cumuls quotidiens, avec une variabilité interannuelle très forte, qui explique la forte incertitude (de +7 à +39 %) sur l'ampleur de cette intensification » (Ribes et al., 2019). Le Gard, l'Ardèche, l'Hérault et la Lozère sont les départements les plus touchés par des épisodes apportant plus de 200 mm en 24h (en moyenne, 1 fois par an pour le Gard et l'Ardèche et tous les 1 à 2 ans pour l'Hérault et le Lozère).

Les prévisions montrent que les vagues de chaleur, les pluies intenses, les épisodes de sécheresse, qui peuvent entraîner à leurs tours des inondations, des éboulements, des glissements de terrain ou encore des avalanches pourraient se multiplier dans les années à venir. Concernant ce dernier aléa, le départ d'une avalanche est le résultat d'une interaction complexe entre terrain, enneigement et conditions météorologiques, qui peuvent conduire au glissement de neige sèche ou humide. Selon le rapport « Climate change adaptation and disaster risk reduction in Europe » (EEA, 2017), « l'activité d'avalanches de neige sèche et humide a augmenté entre 1952 et 2013 en Europe, surtout au milieu de l'hiver et à haute altitude ».

Cependant, la relation entre fréquence et magnitude des avalanches et changements climatiques est incertaine. On peut observer que les changements possibles de fréquence et de magnitude des avalanches sont liés aux changements de l'enneigement, avec une possible réduction des risques d'avalanche à basses et moyennes altitudes (suite à l'augmentation des températures en hiver), bien que des phénomènes plus fréquents de précipitations fortes puissent contrecarrer cette tendance (PLANALP, 2016).

Dès lors, un travail de préparation de la population et des acteurs du territoire est nécessaire, afin de mieux faire face aux conséquences de ces changements climatiques et notamment en termes de santé.

Ces effets peuvent se caractériser dans ce domaine par la hausse des maladies chroniques et l'émergence de nouveaux virus, la détérioration de la qualité de l'air causée par la combinaison de vagues de chaleur et d'une concentration accrue d'O₃ troposphérique (Andersson et al., 2007 ; Zampieri et al., 2013 ; Hertig et al., 2020 ; Gong et al., 2020), la hausse de la mortalité liée aux canicules, et de manière plus globale une dégradation de la qualité de vie (voir **chapitre-enjeu Santé**). Cette préparation doit permettre de mettre en œuvre des processus d'adaptation à ces effets en travaillant sur une mutation profonde des comportements individuels et collectifs, afin de transformer les secteurs économiques et les activités dont la pérennité est mise à mal par ces phénomènes (voir **chapitre-enjeu Enjeux psychosociologiques**).

La viabilité des activités touristiques, qui sont un atout majeur des régions de montagnes et notamment pendant la saison hivernale, est fragilisée par les modifications de l'enneigement dont la tendance est à la baisse (voir **chapitre-enjeu Tourisme**). D'autres secteurs économiques essentiels au territoire tels que l'agriculture et l'élevage pourraient également être contraints. Les événements climatiques extrêmes ont des conséquences importantes sur la quantité, la diversité et la qualité des alpages (Nettier et al., 2010 ; Climfourrel, 2011 ; Dumont et al., 2015). Les changements de température et d'humidité suite aux extrêmes climatiques ont également une influence directe sur l'état sanitaire (en particulier du bétail en stabulation) et le rendement de la production issue des troupeaux (voir **chapitre-enjeu Agrosystèmes**).

Les nouvelles conditions climatiques basées sur les projections énoncées plus haut pourraient favoriser une propagation et une prévalence accrue des maladies animales y compris celles transmises par vecteurs (Estrada-Peña et al., 2012 ; Gaulty et al., 2013). Enfin, au-delà des activités économiques, il est essentiel de porter une attention particulière au bâti et aux infrastructures, qui accueillent habitants et touristes et contribuent à l'intégrité physique et la sécurité de ces derniers, qui pourraient être mis en danger lors d'événements météorologiques (Nogués-Bravo et al., 2007 ; Rico et al., 2017), dont la fréquence et l'intensité pourraient augmenter du fait des changements climatiques.

Ces changements et événements climatiques extrêmes ont déjà des conséquences observables dans les milieux montagnards d'Occitanie. Toutefois, des adaptations sont possibles, parfois génératrices d'opportunités pour les populations et les territoires, et nécessitent, pour leur mise en œuvre, l'implication de toutes les parties prenantes du territoire.

Améliorer les niveaux de préparation et de prévention face aux risques naturels

Les aléas naturels typiques des zones de montagne se déclenchent sous l'effet d'événements météorologiques (précipitations intenses ou prolongées de pluie ou de neige, cycles de gel/dégel, fortes chaleurs, etc.) et vont affecter les territoires qui y sont exposés et sur lesquels sont implantées des activités socio-économiques.

C'est la rencontre du phénomène naturel (type, intensité, période de retour à la normale), l'exposition et la vulnérabilité des systèmes socio-économiques concernés (habitats, voies de circulation et autres aménagements urbains, occupation des sols, activités économiques...), et l'impact des changements climatiques sur les caractéristiques de l'aléa qui déterminera alors le niveau de risque naturel (affaissements, glissements de terrain, éboulements, crues, inondations...).

La plus grande variabilité climatique et l'intensification de certains phénomènes météorologiques (sécheresses, précipitations extrêmes ou canicules) sont associées à une fréquence et intensité plus importantes des aléas naturels typiques des zones de montagne.



Crédit photo : pexels.com

A ce jour, même s'il reste difficile de corréliser scientifiquement l'augmentation des températures et de ces événements extrêmes, le constat montre une augmentation significative de leur survenue sur les dernières années. Par exemple, on observe une augmentation significative des chutes de blocs sur le versant nord-ouest du Vignemale associée à une dégradation du pergélisol (Rico et al., 2017 dans OPCC, 2018).

Une étude récente (Bernardie et al., 2021) montre que l'occurrence des glissements de terrain dans les Pyrénées françaises pourrait augmenter de 1,5 (entre 2021 et 2050) à 4 fois (entre 2071 et 2100) dans le cas du scénario RCP8.5. Cette augmentation est le résultat de la combinaison de plusieurs facteurs qui ne se limitent pas aux changements climatiques, tels que le type d'occupation des sols, l'humidité du sol, la présence plus ou moins importante de végétation et d'espaces boisés (qui peut augmenter la stabilité du sol grâce aux racines des arbres, mais aussi la réduire par son poids).

L'étude montre que les glissements de terrain peu profonds sont généralement causés par des pluies plutôt courtes mais dont l'intensité est plus forte, alors que des glissements de terrain plus profonds sont davantage causés par des changements de long terme (modification des niveaux mensuels des précipitations, des niveaux saisonniers de l'enneigement...). Ces phénomènes naturels menacent la sécurité des habitants du territoire et des touristes, mais aussi l'intégrité du paysage, qui est parfois modifié de manière irréversible.

Si les Pyrénées ont jusqu'alors été relativement épargnées par les grands incendies grâce au taux d'humidité assez élevé des combustibles, elles y sont de plus en plus exposées aujourd'hui. Plusieurs phénomènes expliquent cette augmentation ; la quantité de combustible a augmenté en raison de l'abandon progressif de l'agropastoralisme, causant un embroussaillage

des zones pastorales de moyenne et haute montagne. Ces combustibles sont plus secs et plus inflammables à cause des épisodes de sécheresse et de la diminution du manteau neigeux, qui permettait jusqu'à alors d'emmagasiner un certain niveau d'humidité dans le sol et les végétaux et protégeait la végétation du soleil pendant une période de l'année.

La pratique très ancienne de l'écobuage peut également être responsable d'importants incendies de forêts et fait l'objet d'une attention et une réglementation particulière afin de limiter les risques d'emballement de ces feux. Dans les Cévennes, le risque incendie devrait augmenter dans les décennies à venir malgré une gestion des feux renforcée qui a montré des résultats efficaces dans les années 1990.

Aujourd'hui, on constate un risque croissant d'incendies dits « convectifs », qui sont des feux induits par des conditions chaudes et sèches. Le nombre de jours qui présentent ces caractéristiques météorologiques, avec un Indice Forêt Météo (IFM) supérieur à 30, devrait doubler dans le cas du scénario RCP4.5 et tripler dans le scénario RCP8.5 d'ici la fin du siècle (GREC-Sud et RECO, 2020). Enfin, au-delà du risque que font courir les incendies aux biens et aux personnes, ils peuvent affecter la capacité des forêts à maîtriser ou réduire les aléas naturels.

Accompagner les acteurs du territoire pour affronter la pénurie d'eau et les sécheresses

La ressource en eau est présente dans différents espaces des milieux montagnards et sous différentes formes (glaciers, manteau neigeux, fleuves, rivières, lacs, tourbières, zones inondées et aquifères). Au fil des saisons, les phénomènes de précipitation, évapotranspiration, écoulement de surface, infiltration et recharge des eaux souterraines se succèdent et constituent le bilan hydrologique. Ces phénomènes déterminent les quantités et la répartition de la ressource en eau entre les réservoirs superficiels et souterrains.

Les changements climatiques perturbent ces processus naturels et altèrent la qualité et la disponibilité de la ressource en eau. Les montagnes d'Occitanie ont une importance majeure pour les ressources en eau, car c'est au niveau des têtes de bassins versants qu'est constituée une part très importante des débits de surface et des eaux souterraines qui sont utilisées en aval dans les bassins de l'Adour ou de la Garonne.

Modifications des débits totaux et de la quantité d'eau de surface

Les données empiriques, par le biais de l'étude des séries instrumentales du réseau de stations hydrométriques couvrant les Pyrénées, montrent des signes de changement dans les contributions moyennes annuelles des rivières des Pyrénées au cours des dernières décennies.

Dans les sous-bassins pyrénéens du Têt et du Tech, une diminution significative des flux annuels dans la plupart des stations hydrométriques a été constatée (Lespinas et al., 2009 ; 2014). Cependant, l'attribution des baisses de débit dans les cours d'eau, c'est-à-dire l'identification de leurs causes, climatiques et non climatiques, reste encore difficile à déterminer (Beguiria et al. dans OPCC, 2018).

Malgré cela, l'utilisation de modèles de simulation hydrologique permet aussi d'estimer l'évolution future des débits annuels face à divers scénarios de changements climatiques. Pour l'Ariège, il a été estimé une baisse d'environ 20 % des débits annuels et saisonniers pour la période 2055-2065 par rapport à la période de référence 1985-1995 (Caballero et al., 2007), en considérant un scénario d'augmentation de la température moyenne de 2 °C. Dans les Cévennes, le constat est identique, les scénarios prévoient une diminution des débits estivaux (environ 30 %) et hivernaux (entre 10 et 15 %) d'ici la

fin du siècle, une augmentation du risque de sécheresse agricole (déficit en eau dans les sols), mais aussi une diminution des débits d'étiages et une hausse de l'évapotranspiration (GREC-Sud et RECO, 2020).

Diminution de l'enneigement et précocité de la fonte nivale

L'augmentation des températures provoque une moindre fréquence des épisodes de neige en moyenne montagne, une augmentation des précipitations hivernales sous forme de pluie jusqu'à des altitudes de plus en plus élevées ainsi qu'une apparition précoce de la fonte nivale (Lopez-Moreno et al., 2020). Les projections sur le régime d'écoulement des rivières montrent une hausse des débits en hiver et une diminution au printemps (aujourd'hui soutenus en cette période par la fonte nivale, dont le pic apparaît plus tôt dans l'année) et en été à cause d'une diminution des précipitations (OPCC, 2018).

Les projections climatiques indiquent une augmentation de ces tendances, avec une réduction importante de l'accumulation de neige, qui, dans le dernier quart du XX^e siècle, pourrait atteindre -78 % en dessous de 1500 m (OPCC, 2018) selon la moyenne des modèles employés et le scénario RCP8.5.

Risque d'étiages plus prononcés

Une tendance négative généralisée a été constatée sur les débits en période d'étiage pour la période 1968-2008 dans les Pyrénées (Giuntoli et Renard, 2010). En plus des périodes de sécheresse plus longues et plus sévères, la diminution des débits d'automne (saison de l'année dont la tendance négative est particulièrement significative sur l'ensemble du territoire) provoque l'allongement de la période des étiages (OPCC, 2018). L'effet combiné des changements climatiques et des différents types d'occupation des sols dans le futur accentuerait ces changements (Boé et al., 2009).

Des simulations sur la période 2046-2065 comparées à la période de référence 1970-1999 montrent des réductions générales du débit de l'Ariège, plus marquées au printemps et au début de l'été. Au contraire, les débits d'hiver montrent une légère augmentation par rapport à la période de référence, en raison d'une plus grande fréquence des épisodes de pluie par rapport aux épisodes de neige.

Garantir la qualité des eaux superficielles et souterraines

Les modifications du bilan hydrologique vont entraîner des modifications en termes de qualité et de disponibilité des eaux superficielles et souterraines. Le Massif central est réputé pour la richesse de son réseau hydrographique et ses nombreux cours d'eau (dont la Dordogne et le Tarn en Occitanie) et plans d'eau. La pluviométrie y est extrêmement importante, notamment au Mont Lozère ou au Mont Aigoual et en particulier durant l'hiver. Cela fait du Massif central le « premier massif français pour l'activité économique générée par l'exploitation des eaux souterraines » (SIDAM).

Eaux superficielles

Les lacs sont des systèmes dynamiques qui évoluent régulièrement en réponse à leur environnement (températures, précipitations, intrants atmosphériques, usages du bassin versant, etc.). La variation de la disponibilité en eau et l'augmentation des températures va entraîner une altération des caractéristiques physico-chimiques des lacs, moins marquée pour les lacs profonds qui ont une inertie thermique plus élevée et réagissent plus lentement aux « changements physiques (gradients de température et densité), chimique (salinité, l'alcalinité, pH, nutriments) et biologique (productivité primaire, composition des communautés biologiques) » (OPCC, 2018).

Dans les montagnes pyrénéennes, les changements climatiques pourraient avoir des conséquences sur la température de l'eau, mais également sur la dynamique de mélange du lac, la durée d'englacement, la stratification thermique et chimique de la colonne d'eau (Råman Vinnå et al., 2020) et la disponibilité en nutriments qu'il contient. Les travaux du réseau Lacs Sentinelles, composé de gestionnaires d'espaces protégés et de scientifiques, ont permis d'identifier ces changements et les mutations qu'ils induisent sur les lacs d'altitude, à l'aide par exemple de capteurs de température installés à différentes profondeurs (lac d'Aumar, Hautes-Pyrénées et lac d'Izourt, Haute-Ariège).

Eaux souterraines

Les impacts des changements climatiques sur les eaux souterraines seront très variables ; ils dépendent du type de formation géologique dans lequel elles se trouvent, de leur degré de confinement, des interactions hydrauliques avec les cours d'eau qui s'écoulent à proximité et du niveau d'exploitation qui en est fait (voir **chapitre en jeu Eau**). Les modèles montrent toutefois une diminution généralisée de leur recharge, à cause du changement d'occupation des sols, en particulier la revégétalisation, qui devrait s'intensifier dans les années à venir. À cela s'ajoutent les effets des changements climatiques : la fonte nivale plus précoce, la réduction des niveaux des précipitations et un taux d'évapotranspiration plus élevé.

Il apparaît que ces conséquences seraient plus importantes pour les aquifères de surface et peu profonds. Selon une étude de Caballero et al. (2015) qui présente une estimation des impacts du changement des précipitations sur la recharge des aquifères libres dans le bassin Adour-Garonne, **la recharge des aquifères de la région pyrénéenne (Pyrénées-Atlantiques, Hautes-Pyrénées, Haute-Garonne et Ariège) pourrait diminuer de 10 % en 2050**. Cette estimation correspond à la moyenne des résultats obtenus pour les scénarios RCP2.6 et 8.2 établis sur « un ensemble de cinq modèles climatiques régionalisés par deux méthodes différentes et appliquées à deux méthodes différentes de calcul du bilan hydrique, afin d'explorer le degré d'incertitude des résultats » (OPCC, 2018).

Les tourbières, zones humides emblématiques des paysages montagnards

Les tourbières sont des écosystèmes particulièrement fragiles et sensibles aux effets des changements climatiques, en particulier celles qui sont localisées en haute altitude, avec des températures basses, une couche de glace présente pendant plusieurs mois de l'année, une forte radiation solaire et une faible présence de nutriments (ultra-oligotrophie). L'accumulation de matière organique (turfigénèse) a été rendue possible par les caractéristiques de ces milieux (saturation en eau).

Les tourbières des Pyrénées et du Massif central n'ont pas toutes été identifiées mais nous savons que certaines ont pu se former par le retrait des glaciers à la fin de la dernière déglaciation, d'autres par l'activité humaine ou encore via un processus de paludification (ce processus se caractérise par l'initialisation de la tourbe dans des habitats précédemment plus secs et végétalisés sur des sols inorganiques, sans phase entièrement aquatique).

Elles ont une fonction essentielle de puits de carbone (même si l'estimation de la quantité de carbone stocké n'existe pas à ce jour) et assurent la qualité et une plus grande régularité de l'eau en amont des bassins hydrologiques (rôle d'éponge en saison pluvieuse et de relargage en période sèche). Ces milieux sont également des réservoirs de biodiversité et abritent des écosystèmes extrêmement riches, notamment en micronutriments. En tenant compte de toutes ces caractéristiques, nous pouvons identifier plusieurs types d'impacts des changements climatiques sur les tourbières, tels que la dégradation de ces milieux, l'érosion de leur biodiversité, l'inversement de leur rôle de puits de carbone et la perte de services écosystémiques (OPCC, 2018).

Modifications physico-chimiques des eaux

Les caractéristiques physiques et chimiques des eaux peuvent être modifiées et conduire à une plus forte concentration de polluants. C'est une des conséquences de la diminution des débits (combinée à une hausse des rejets de substances polluantes dans la nature par les activités anthropiques), mais aussi des périodes de sécheresse et d'étiage qui s'allongent. La quantité d'eau, diminuée sur le long terme, ne suffit plus pour diluer les

polluants qui se trouvent dans les milieux aquatiques. Enfin, les inondations peuvent remobiliser les polluants retenus dans les sédiments et accroître leur concentration.

Ces facteurs se combinent et, couplés à des activités anthropiques (changement d'occupation des sols, mise en culture de surfaces fourragères rendant les sols à nu en hiver, revégétalisation, activités polluantes, etc.), ils induisent des impacts sur la biodiversité et la santé des écosystèmes de haute montagne.

Maintenir l'attrait touristique

Les milieux montagnards bénéficient d'attraits particuliers qui leur valent d'être plébiscités pour des activités touristiques au cours de différentes saisons. Sous l'effet des changements climatiques, les projections d'évolution des caractéristiques des événements météorologiques extrêmes et les risques naturels liés indiquent des impacts considérables sur les activités touristiques des milieux montagnards. Cela concerne la viabilité de certaines activités, des infrastructures, mais aussi l'attractivité du territoire pour ses caractéristiques patrimoniales.

Les sports d'hiver sont directement confrontés aux effets des changements climatiques avec la diminution de l'enneigement (figures 7.4 et 7.5), qui a déjà eu pour conséquence une diminution du nombre de jours skiabiles, ainsi qu'un recul de la date d'ouverture des saisons de ski. Ces retards sont compris entre cinq et 55 jours dans les stations de basse altitude et entre cinq et 30 jours dans les stations d'altitude moyenne (OPCC, 2018).

Certaines stations, moins vulnérables en raison de certaines caractéristiques (altitude, pente et exposition principalement) et dont le niveau d'enneigement permet de

poursuivre les activités de ski, pourront temporairement être privilégiées par les touristes dont la répartition se fera sur un nombre plus réduit de stations disponibles. La figure 7.7 montre, en bleu, les stations qui devraient pouvoir être en mesure de poursuivre leur activité, en jaune, les stations qui pourraient maintenir leur capacité à fonctionner grâce à la production de neige artificielle, et en rouge, les stations pour lesquelles cette solution ne sera pas viable.

Les adaptations techniques, telles que le recours à la production de neige artificielle mise en œuvre par la majorité des stations, ou encore le transport de neige par hélicoptage ne sont pas sans conséquences ; **elles présentent des externalités environnementales négatives (une demande énergétique croissante, des prélèvements significatifs sur la ressource en eau), et leur capacité à être efficaces dans le cas de forts niveaux de réchauffement n'est pas assurée** car la hausse des températures hivernales affecte la capacité à produire cette neige artificielle avec les technologies actuelles.

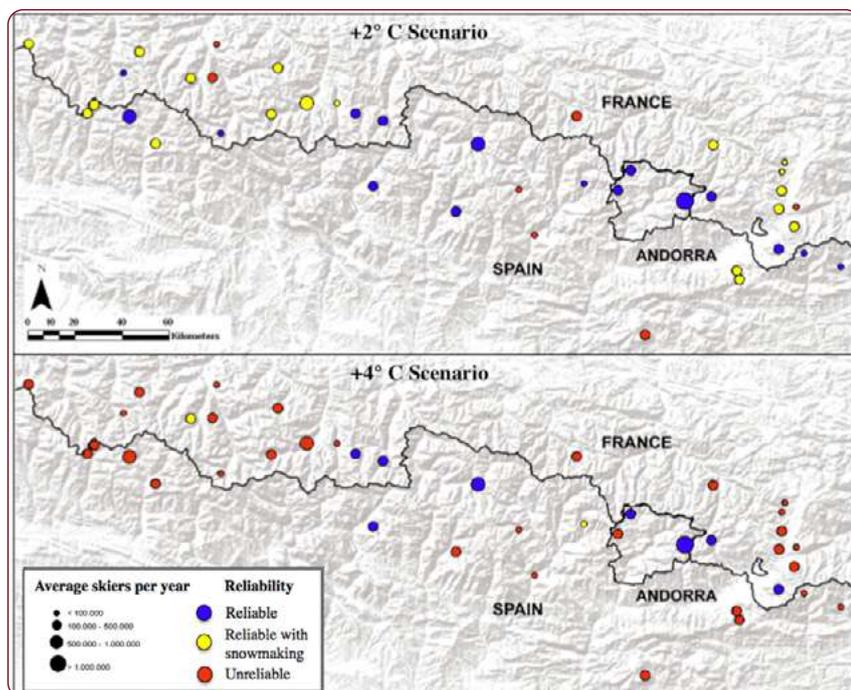


Figure 7.7. Évolution de la capacité à fonctionner des stations de ski des Pyrénées avec et sans production de neige artificielle, pour deux horizons temporels et scénarios futurs différents (+2 °C, pour 2051-2070, et +4 °C pour 2071-2100). (Source : Pons et al., 2015 dans OPCC, 2018).

L'étude de [Spandre et al. \(2019\)](#) confirme cette tendance à la réduction du nombre de stations où le niveau d'enneigement est fiable en fonction de différents scénarios et horizons temporels. Jusqu'à la catégorie cinq ([figure 7.8](#)), l'enneigement de la station est jugé suffisamment fiable pour maintenir les activités touristiques, au-delà, la diminution de l'enneigement ne permettra plus la poursuite des activités de sports d'hiver tels qu'elles se présentent aujourd'hui. Dès 2030-2050, et pour chaque scénario (car les divergences dans les scénarios se constatent surtout sur le long terme sur la deuxième moitié du XXI^e siècle), les difficultés liées à la diminution de l'enneigement se manifestent dans plusieurs stations.

Une étude récente de WWF France ([WWF France, 2021](#)) sur l'impact des changements climatiques sur la pratique sportive montre que dans un scénario d'augmentation des températures de +2 °C, seulement trois stations de ski pyrénéennes bénéficieraient d'un enneigement naturel suffisant ; à +4 °C, aucune station ne pourrait bénéficier de ce niveau d'enneigement.

Au cours du printemps et de l'été, les montagnes pyrénéennes attirent de nombreux touristes et la région pourrait avoir un avantage concurrentiel par rapport aux zones littorales ou urbaines, plus chaudes, plus densément peuplées et moins agréables pour les activités touristiques. Ainsi, dans le massif pyrénéen comme dans le Massif central, le secteur du tourisme pourrait bénéfi-

cier d'un avantage concurrentiel et se positionner sur un « tourisme de fraîcheur », avec une saison touristique qui pourrait être prolongée, notamment au printemps ou en automne avec l'adoucissement des températures ([Jacob et al., 2018](#)). La diversification des pratiques (randonnée, sports aquatiques, VTT, varappe, thermalisme...) et l'allongement des saisons de tourisme sont encouragées pour ces stations, afin qu'elles puissent perdurer et maintenir des emplois liés au tourisme en favorisant des activités moins vulnérables à la disponibilité de la neige ([Hatt et Viès, 2014](#)).

C'est dans cet objectif que la communauté de communes Causses-Aigoual Cévennes « Terres Solidaires » a travaillé de 2011 à 2020 pour diversifier l'offre touristique du Massif de l'Aigoual (en particulier autour de la station de ski de Prat Peyrot) et faire prendre conscience aux parties prenantes du territoire des changements climatiques en cours. La station s'est tournée vers un tourisme sportif mais aussi patrimonial, échelonné sur quatre saisons. La forêt du Mont Aigoual est notamment reconnue à l'échelle mondiale pour son patrimoine naturel et paysager et est labellisée « Forêt d'exception ».

Néanmoins, **le maintien de l'attrait touristique des zones de montagne doit également tenir compte de changements irréversibles du paysage, qui risquent de modifier la perception de ces espaces**, notamment de la part des touristes.

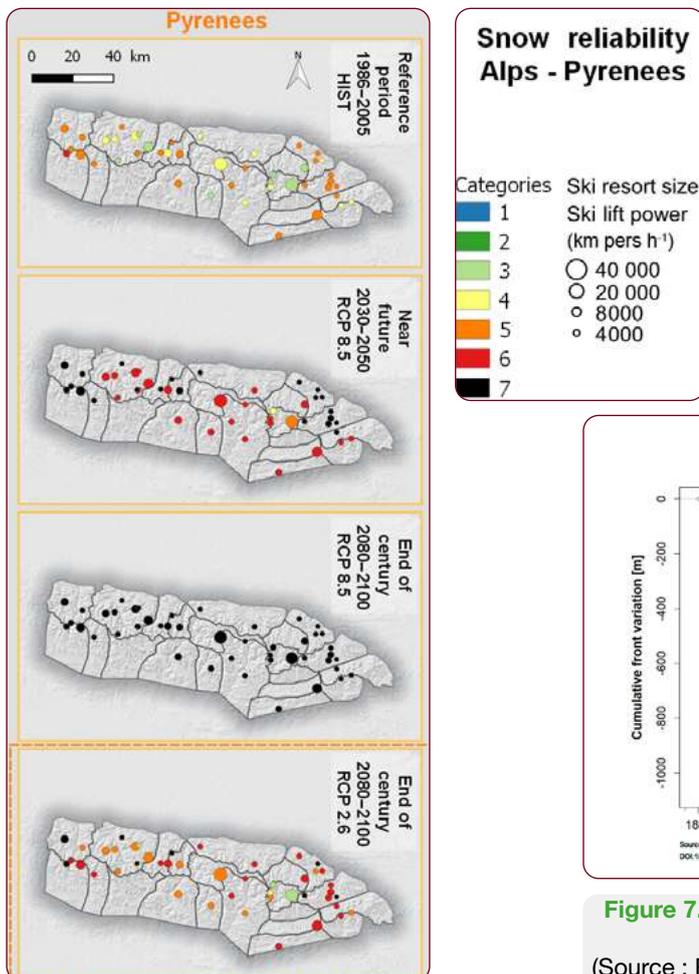


Figure 7.8. Catégorisation des stations de ski pyrénéennes en fonction de la taille de la station et de la capacité à fonctionner (catégories 1, 2 et 3 : les conditions d'enneigement naturel sont satisfaisantes ; catégories 4 et 5 : les conditions d'enneigement sont satisfaisantes avec de la neige artificielle ; catégories 6 et 7 : la neige artificielle ne suffit plus à contrer la diminution de l'enneigement). (Source : adapté de Spandre et al., 2019).

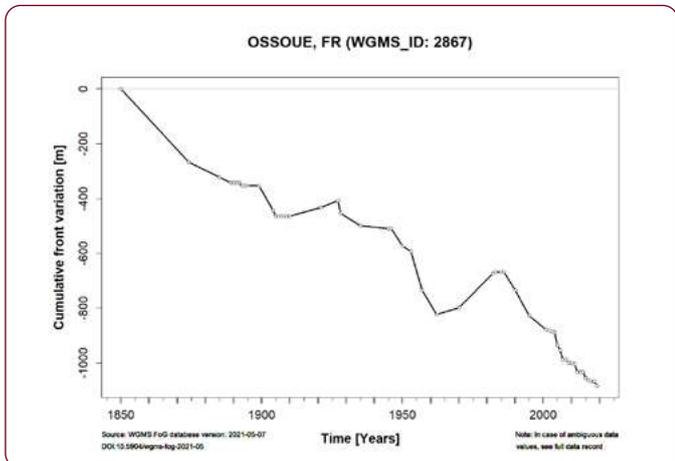


Figure 7.9. Variation de la surface du glacier d'Ossoue sur la période 1850-2018 (52 observations). (Source : René, pour [World glacier monitoring service](#), 2018).

Prévoir des changements irréversibles des paysages

Certains espaces sont particulièrement spécifiques aux milieux montagnards et représentent des atouts culturels, touristiques et patrimoniaux incontournables, tels que les glaciers, les paysages enneigés, les forêts ou encore les lacs d'altitude.

L'étude des changements climatiques, observés depuis près d'un siècle, montre des modifications conséquentes du paysage, transformant alors les perceptions que peuvent avoir les habitants et les touristes de ces milieux, et portant atteinte aux « valeurs culturelles » portées par ces territoires (GIEC, 2019).

Les changements climatiques contribuent également à créer de nouveaux écosystèmes, notamment par les processus de thermophilisation. Ce déplacement de la zone de distribution des espèces faunistiques et floristiques (vers une altitude ou une latitude plus élevée) intervient comme une adaptation aux nouvelles conditions climatiques. Ainsi, certaines espèces végétales méditerranéennes apparaissent, des espèces animales migratrices deviennent sédentaires, etc.

Combinés à d'autres facteurs anthropiques, ces changements conduisent à une homogénéisation du paysage qui, par sa moindre diversité, devient moins résilient aux événements extrêmes et aux changements induits par les modifications du climat.

Glaciers

Les glaciers des Pyrénées présentent **un retrait spectaculaire qui a débuté depuis la fin du XIX^e siècle et s'est considérablement intensifié à la fin du XX^e siècle**. A l'échelle de la région, les neufs glaciers des Pyrénées françaises ne représentent aujourd'hui plus que 79 hectares, contre 140 hectares il y a seulement 17 ans et 450 hectares au milieu du XIX^e siècle. Dans le Luchonnais, le glacier du Seil de la Baque a perdu 90 % de sa surface en 150 ans. Le deuxième plus grand glacier des Pyrénées, avec 145 hectares, s'étendait du Portillon d'Oô à l'est au Port d'Oô à l'ouest, sans discontinuité. Aujourd'hui, il ne compte plus que 16 hectares, en trois zones distinctes.

Le glacier d'Ossoue (Hautes-Pyrénées) fait l'objet d'une analyse de son évolution depuis 2001 par l'Association Moraine en termes de « bilan de masse » (figure 7.9 et 7.10), qui figure dans les indicateurs suivis par l'Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique (ONERC). Entre 1924 et 2019, le glacier d'Ossoue s'est raccourci de 590 m. Sa surface est passée de 90 à 32 hectares, soit 64 % de perte. Sur la même période, la perte d'épaisseur est estimée à environ 80 m (ONERC, 2020). Ce glacier s'est fortement contracté depuis près d'un siècle et ce de manière presque continue. L'évolution du bilan de masse (figure 7.10) montre que l'ablation (perte de masse estivale) est toujours supérieure à l'accumulation (gain de masse hivernal).

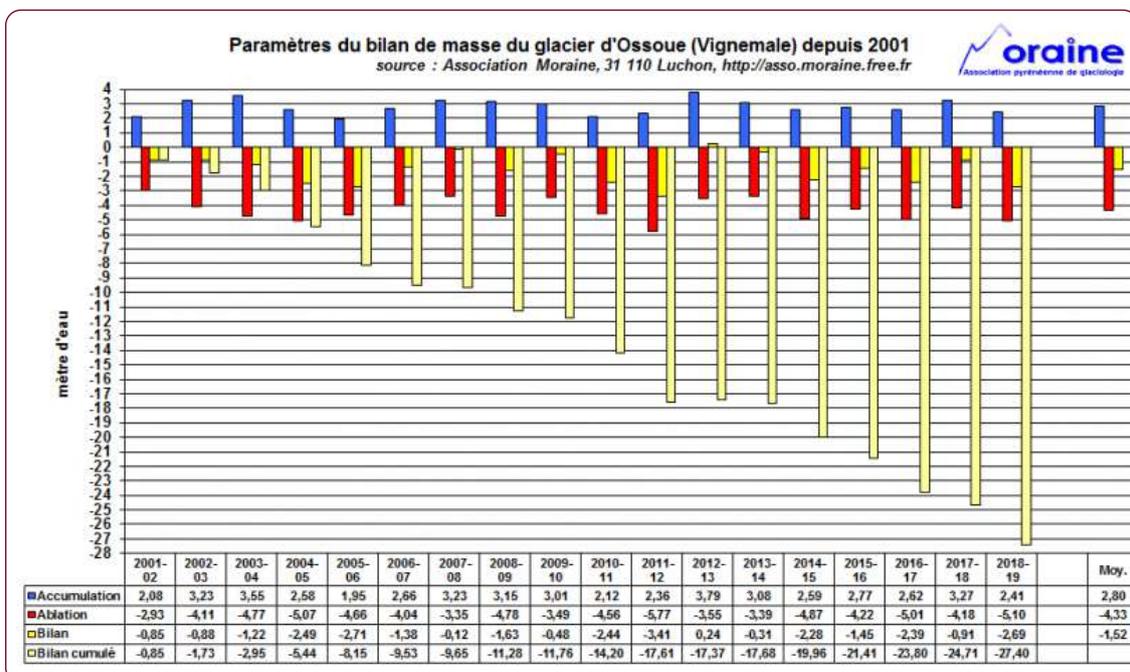


Figure 7.10. Bilan de masse du glacier d'Ossoue depuis 2001.
(Source : Association Moraine).

Faire face aux changements au niveau de la productivité et de la qualité des cultures et saisir les opportunités émergentes

Sur le versant français des Pyrénées, l'agriculture emploie 8,4 % de la population (OPCC, 2018). Ce secteur représente un potentiel économique majeur pour le territoire, fournit des services écosystémiques (production de ressources, protection de la biodiversité, stockage du CO₂) tout en étant également considéré comme une ressource paysagère.

Dans le Massif central, ce secteur représente 4,5 % de la part totale des salariés (3,7 % à l'échelle nationale) et plus de 8 % des actifs. 85 % du territoire du Massif est voué à l'élevage d'herbivores avec 38 % des exploitations orientées en bovins viande, 20 % en bovins lait et 16 % en ovins/caprins (répartition des exploitations par l'Orientación technico-économique des exploitations agricoles). Avec 4,4 millions de têtes (57 % du cheptel national), l'élevage bovin est l'activité dominante (SIDAM).

Ces paysages agricoles représentent des ressources paysagères et patrimoniales pour le territoire et contribuent à la préservation des milieux montagnards. Toutefois, les changements climatiques entraînent, pour ces activités, des situations de stress thermique, hydrique, des risques hydrologiques et de pertes de terres exploitables et cultivables, et la prolifération de maladies et d'espèces nuisibles envahissantes.

La capacité de production des cultures est fortement conditionnée par deux facteurs : la température et la quantité d'eau disponible dans le sol. Les changements climatiques influencent directement les deux variables, pouvant entraîner des effets négatifs sur la quantité et la qualité de la production finale.

Les principaux impacts des changements climatiques sur l'agroécosystème Occitan de moyenne et haute montagne se caractérisent par une diminution de la production en raison du stress thermique et hydrique accru subi par les cultures, une potentielle perte de terres agricoles en raison de l'augmentation des risques hydrologiques, et un risque important de propagation de parasites et de ravageurs.

Des changements agro-phénologiques ont également été relevés dans les cultures : la hausse progressive des températures moyennes provoque l'avancement d'une partie importante du calendrier agricole, et a provoqué en particulier l'avancée de la date de floraison et de récolte de nombreuses cultures.

Néanmoins, des effets positifs pourraient être observés grâce à l'effet fertilisant du CO₂ atmosphérique et l'allongement de la saison de croissance.

De même, des changements dans le régime thermique, en particulier à haute altitude, peuvent également représenter des opportunités. **De nouvelles cultures (d'origine méditerranéenne notamment, telles que la vigne ou l'olivier) pourraient trouver dans les milieux montagnards d'Occitanie des conditions adéquates pour se développer** (Ponti et al., 2014).

Aussi, des recherches en cours (INRAE, 2021) étudient les capacités d'adaptation des plantes, notamment le ray-grass anglais (graminée fourragère couramment utilisée en France), déjà menacé par les changements climatiques dans le Sud de la France. Des stratégies de migration « assistée », accompagnées de méthodes de gestion appropriées des prairies et de la création de nouvelles variétés de ray-grass pourraient permettre de conserver cette espèce et la rendre plus résiliente aux aléas climatiques.

En haute montagne, les pelouses sont une ressource essentielle pour l'économie du territoire et rendent de nombreux services écosystémiques à la société (séquestration du carbone, entretien de la biodiversité, ressource paysagère (Leip et al., 2015).

L'augmentation de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, la hausse de la température moyenne de l'air qui en découle, ainsi que les changements du régime saisonnier des précipitations et la plus grande fréquence et intensité des événements climatiques extrêmes, pourraient avoir des conséquences considérables sur les pâturages, provoquant des impacts positifs ou négatifs et de différente ampleur selon les zones concernées (OPCC, 2018).

Les changements climatiques favorisent la propagation de certaines espèces herbacées et d'arbustes très compétitifs et déplacent les autres espèces, provoquant une perte de diversité floristique des pelouses. **D'autre part, ces changements agissent en synergie avec l'actuelle tendance de dégradation des agro-écosystèmes et l'abandon progressif de l'agropastoralisme de haute montagne dans de nombreuses zones des Pyrénées.**

Faire face à l'éventuelle perte progressive de la biodiversité et les modifications des écosystèmes climatique et global

Faune et flore

La faune et la flore des régions de montagne sont caractérisées par une forte endémie, et le climat apparaît comme le principal facteur régulateur de l'écosystème et de la phénologie des espèces faunistiques et floristiques. Les changements climatiques risquent d'impacter de multiples manières les cycles de vie des espèces, en termes notamment de productivité, d'abondance et de diversité des populations.

Par exemple, la fonte précoce et la diminution globale du manteau neigeux exposent plus tôt et de manière plus prononcée les plantes (dont les graines seront moins protégées des gelées) et les herbes, que l'exposition au soleil pourrait faire sécher et rendre moins abondantes pour nourrir les herbivores.

Les aires de répartition seront également impactées, car certaines espèces se déplacent plus en altitude pour retrouver des conditions climatiques favorables à leur développement, mais cela les isole et les fait entrer en concurrence avec d'autres espèces.

Cette migration les expose à de nouveaux prédateurs et dans certains cas extrêmes à l'hypoxie, à des niveaux de rayons ultra-violet plus élevés, ou encore à des cycles thermiques plus contrastés auxquels ils ne sont pas adaptés.

De manière plus globale, on remarque des modifications dans les cycles phénologiques des espèces (bourgeonnement, floraison, feuillaison, fructification, jaunissement automnal pour la flore et périodes de reproduction, ponte, migration pour la faune). **Certaines espèces de papillons et d'oiseaux migrateurs apparaissent déjà plus tôt dans l'année et repartent à leur lieu d'origine plus tard** (OPCC, 2018).

Sur la **figure 7.11**, les zones en gris correspondent aux zones actuelles potentiellement favorables pour le *Calotriton asper*, mais qui ne le seront probablement pas à l'avenir, et les zones en noir correspondent aux zones du territoire pyrénéen qui resteront potentiellement favorables malgré les changements et les limites de dispersion de l'espèce. Les différentes couleurs indiquent le moment estimé de colonisation des nouvelles zones colonisées.

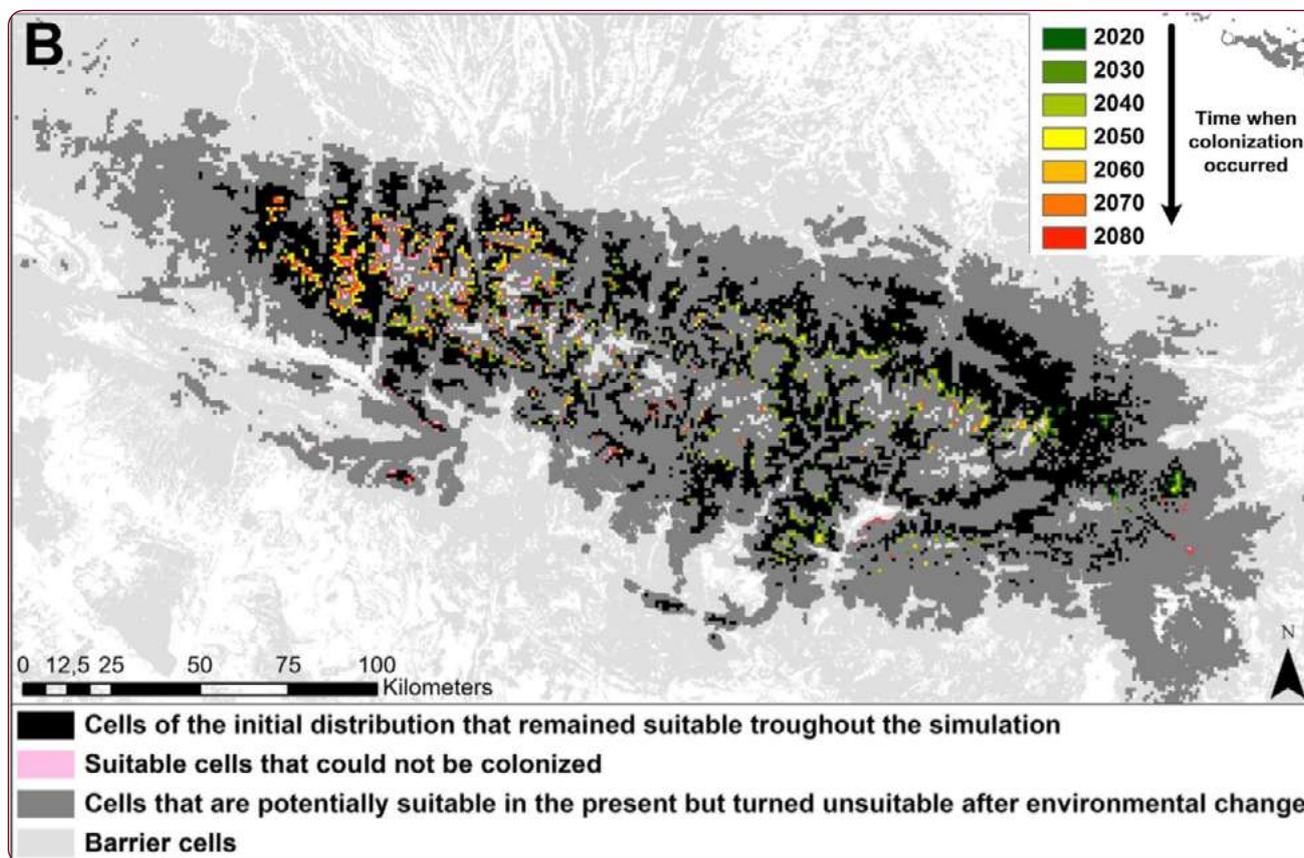


Figure 7.11. Évolution estimée de la répartition potentielle de *Calotriton asper* dans la chaîne pyrénéenne en 2080 par rapport à la répartition actuelle, en utilisant la moyenne des trois modèles de circulation mondiale (GCM : CCCMA, HADCM3 et CSIRO) et le scénario d'émissions SRES A2. (Source : d'après de Pous et al., 2015 dans OPCC, 2018)

De plus, toutes les espèces n'ont pas les mêmes capacités d'adaptation et de dispersion, et sont toutes dépendantes d'interactions-clés entre faune et flore qui, lorsqu'elles sont désynchronisées, auront de multiples conséquences sur la phénologie de plusieurs espèces. Par exemple, les cycles de vie de certains mammifères comme l'isard sont « lancés » par la croissance des espèces végétales dont ils s'alimentent.

Autre espèce emblématique des milieux montagnards, le lagopède, voit la couleur de ses plumes changer en fonction de la saison : il devient blanc en hiver, ce qui le camoufle des prédateurs. Tous ces changements peuvent entraîner des modifications dans les relations proie-prédateur, parasite-hôte, herbivore-végétaux, ou encore plante-pollinisateur et causer un déséquilibre généralisé de cet écosystème riche mais fragile.

Forêts

La forêt recouvre 36 % de la région Occitanie et représente 2,6 millions d'hectares, ce qui en fait la deuxième région la plus boisée de France. La forêt occitane est composée principalement de 77 % de feuillus (chênes, châtaigniers) et 23 % de résineux (pins, sapins, épicéas) (ONF). Les fortes chaleurs risquent de freiner la croissance des populations et réduire leur capacité à stocker le carbone, de les rendre plus vulnérables aux incendies et donc limiter leur rôle de protecteur face aux risques naturels, ou encore entraîner des processus de thermophilisation.

Les forêts des Cévennes recouvrent 72 % du territoire du Parc national des Cévennes, et sont composées d'espèces très diversifiées selon le sous-ensemble concerné (influence méditerranéenne dans le sud-est et montagnarde dans le centre et nord-ouest). **Les espèces méditerranéennes comme le chêne vert sont plus sensibles aux changements climatiques et présentent déjà des niveaux de dépérissement importants.** Une autre essence est particulièrement fragilisée par les changements climatiques : le châtaignier, dont la production est historique dans les Cévennes et s'est caractérisée par une monoculture, exploitée sous forme de vergers.

Pour lutter contre le dépérissement de cette espèce, plusieurs stratégies d'adaptation ont été mises en place, comme la diversification des essences, le choix d'essences plus résistantes à la chaleur, mais cela a aussi permis l'expérimentation de techniques innovantes visant à réduire le ruissellement et le risque inondation (Nature 2050).

Le territoire du Haut-Languedoc, situé en moyenne montagne, se trouve à la croisée de trois influences climatiques : méditerranéenne, montagnarde et océanique. A travers le projet FORECCAsT, une quarantaine d'enjeux ont été identifiés et concernent la sylviculture, le foncier forestier et la gestion durable ; l'environnement (patrimoine naturel, forêts anciennes, biodiversité, eau, carbone, risques naturels, sanitaires et climatiques) ; la préservation des paysages ; la filière forêt-bois (politiques stratégiques, mobilisation et valorisation de la ressource locale, structuration) ; la multifonctionnalité forestière (accueil du public, produits non ligneux, lien avec l'agriculture).

L'identification et la réduction des vulnérabilités des forêts du territoire (facteurs prédisposants) permet de mieux faire face aux aléas (facteurs déclenchant), et être plus efficace en cas de crises comme celles de 2003 (sécheresses impactant les résineux), 2006 (épisodes de givre entraînant des bris de cimes et de branches), 2009 (tempête Klaus), ou encore d'autres événements tels que des incendies (dont les probabilités d'occurrence augmentent dans le temps et dans l'espace), des maladies (scolytes, bandes rouges) ou des intempéries diluviennes (Bec, 2018).

Gestion forestière et filière bois

L'Occitanie représente entre 6 et 7 % de la production nationale de bois, avec 8000 entreprises et 32 000 emplois (Plan Montagnes 2018-2025). En 2018, le bois d'œuvre représentait 53 % des récoltes, le bois d'industrie 30 %, et 17 % était destiné à la production d'énergie. Les récoltes en Occitanie représentent 39 % de l'accroissement naturel des forêts (IGN, 2016).

Le volume total de bois de la région croît donc chaque année. On dénombre également 333 entreprises d'exploitation forestière, dont 134 scieries en activités et 2 en projet dans la région, à Mazamet dans le Tarn et à Lanmezan dans les Hautes-Pyrénées (Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Forêts).

Les méthodes de gestion forestière permettent de répondre aux défis des changements climatiques et d'adapter les forêts, mais aussi de dynamiser la filière bois, désenclaver les forêts de montagne sans porter atteinte à la biodiversité (grâce notamment aux techniques de débardage par câble), mais aussi de prévenir les risques naturels face auxquels les forêts peuvent s'avérer être un atout essentiel.

Faire face à la plus grande propagation de maladies, de vermines et d'espèces envahissantes

Les changements climatiques influencent les interactions entre faune et flore qui garantissent l'équilibre des écosystèmes. La rapidité des changements climatiques et leur caractère inédit vont modifier (dans des proportions encore incertaines) les aires de répartition des espèces et les caractéristiques des milieux. Cela pourrait altérer leurs capacités à s'adapter et faire face à ces nouvelles conditions climatiques et aux nouvelles espèces nuisibles et/ou envahissantes.

Celles-ci profitent des nouvelles conditions climatiques favorables à leur développement pour s'installer et pérenniser leur présence sur des territoires sur lesquels elles étaient jusqu'alors inconnues ou peu présentes, comme la chenille processionnaire du pin (Toïgo et al., 2017), l'acarien parasite *Varroa destructor* qui s'attaque fortement aux colonies d'abeilles, le cynips du châtaignier ou encore le chancre du platane.

Dans ce cas, certaines espèces peuvent devenir nuisibles pour d'autres, et se développer de manière trop importante du fait de conditions plus favorables. Cette nouvelle répartition des espèces modifie également les relations entre les différentes populations et notamment entre les parasites et hôtes.

Pour les végétaux, d'autres facteurs entrent en jeu dans la propagation des maladies telles que l'humidité des sols et de l'atmosphère et les températures moyennes. Globalement, les changements climatiques influencent la dissémination et l'apparition de nouveaux ravageurs à travers plusieurs facteurs : les nouvelles conditions cli-

matiques et environnementales, qui vont créer des espaces propices au développement d'espèces nuisibles et/ou envahissantes et renforcer leur capacité de développement et d'expansion (comme c'est le cas avec la balsamine de l'Himalaya ou la jussie dans certains lacs), et enfin la fréquence et l'intensité des états de stress abiotique, qui rendraient les cultures plus sensibles et plus vulnérables aux attaques des organismes pathogènes (OPCC, 2018).

Une des activités les plus répandues dans les zones de montagnes n'est pas épargnée car l'élevage est confronté à de nombreuses maladies émergentes qui touchent le bétail. **Le développement de ces maladies impacte la santé des animaux d'élevage, leur bien-être, leurs performances reproductives, et plus globalement leur résistance aux maladies.** Certaines maladies ont connu une recrudescence au cours des dernières années, telles que la leishmaniose, la maladie de la langue bleue, la fièvre hémorragique Crimée-Congo.

A ces maladies s'ajoutent d'autres phénomènes qui fragilisent la résistance des animaux, tels que les périodes de stress thermique (augmentation de la fréquence respiratoire, de la transpiration et de la consommation d'eau pour compenser la hausse de la température corporelle, mais aussi réduction de la consommation d'aliments et de l'activité métabolique), ou de stress hydrique (déshydratation) (OPCC, 2018).

S'adapter aux déséquilibres entre l'offre et la demande énergétique et exploiter les opportunités émergentes

Par la morphologie naturelle du paysage, les reliefs des Pyrénées permettent au territoire de contribuer à la production d'énergies renouvelables. Toutefois, les impacts des changements climatiques sur le niveau de production, selon l'énergie considérée, peuvent être positifs ou négatifs. La modification du niveau de l'offre, combinée à une évolution de la demande due à des hivers moins rigoureux (baisse probable de la demande) et des étés plus chauds (hausse probable des besoins en climatisation et de la consommation d'eau), peut générer **un déséquilibre à l'échelle de la région mais aussi dans le cadre de ses importations et exportations énergétiques vis-à-vis des territoires limitrophes, français et espagnols.**

Le développement des énergies renouvelables doit donc tenir compte des évolutions des comportements induits

par les changements climatiques, mais aussi des modifications à mettre en œuvre sur les matériaux et infrastructures de production d'énergies renouvelables pour les rendre plus résistantes aux aléas climatiques et aux pics ou fortes baisses de production.

Energie hydroélectrique

C'est la part la plus importante de la production totale d'énergies renouvelables en Occitanie. 32,7 % de la production électrique en Occitanie vient de la ressource hydraulique, issue de l'écoulement de l'eau sur le lit des fleuves et des rivières (Bilan électrique Occitanie, 2020). Malgré un fort potentiel, la modification des cycles hydrologiques, des débits des cours d'eau, du régime des précipitations et du calendrier de fonte peuvent réduire la capacité des centrales hydroélectriques à produire de

l'énergie, en raison d'un risque de saturation (en cas de pluies intenses, crues ou inondations et au moment de la fonte nivale concentrée au printemps) mais aussi car les ressources en eau seront globalement plus rares (voir le **chapitre-enjeu Mobilité-Énergie**).

Le barrage de l'Oule est un cas particulièrement emblématique car il concentre différentes problématiques auxquelles sont confrontés les usages de l'eau (hydroélectricité et irrigation). Dans le cadre du projet PIRAGUA 2018-2021, les scientifiques étudient l'impact de la sévérité des étiages sur les prélèvements estivaux, la saisonnalité des crues pour la reproduction des poissons, le suivi de l'épaisseur du manteau neigeux, le degré de tolérance des usages à des perturbations, la fréquence des événements extrêmes, etc., afin de modéliser les opérations actuelles de stockage/déstockage de l'eau et tester de nouvelles modalités de gestion des barrages adaptées aux changements climatiques.

Energie solaire

À une échelle plus globale, les études montrent que la production d'énergie solaire pourrait augmenter grâce à une quantité d'énergie atteignant la Terre (degré d'insolation) plus élevée (Jerez et al., 2015 ; Müller et al., 2019) mais ces données ne sont pas disponibles à l'échelle régionale. Cet avantage est toutefois à nuancer car plus les capteurs des panneaux solaires (thermiques

et photovoltaïques) chauffent, moins leur rendement sera élevé.

Energie éolienne

La production d'énergie éolienne dépend de plusieurs variables et de leurs comportements, tels que la vitesse et la distribution des vents, le degré de nébulosité ou la capacité de transmission de l'atmosphère. Les prévisions montrent que la production d'énergie éolienne pourrait augmenter pendant l'hiver et le printemps, mais diminuer pendant l'été et l'automne à cause d'une réduction de la vitesse des vents de 9 %. Cela se traduirait par une baisse de la production de 1 MWh/jour au cours de ce siècle (OPCC, 2018).

Toutefois, des études menées à des échelles plus fines seraient nécessaires pour connaître le potentiel éolien de chaque zone du territoire. Un autre déterminant du niveau de production d'énergies solaire et éolienne vient de l'augmentation de la surface des sites de production. Cela renvoie à d'autres enjeux en termes de protection de la biodiversité, des paysages, de disponibilité des terrains pour le secteur agricole, mais également d'acceptabilité de la part des parties prenantes du territoire. Un contexte propice au développement de ces énergies renouvelables se base sur un équilibre entre les enjeux énergétiques, sociétaux, et environnementaux du territoire.

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Accroître la résilience des productions animales et végétales dans un contexte de changement climatique - 31

GIEE Agrivaleur - *En savoir plus*

AGRIVALEUR, reconnu Groupe d'intérêt économique et environnemental (GIEE) en 2018, a été le premier collectif à parler des problématiques du changement climatique sur la production agricole. L'objectif principal est donc de trouver des solutions et mettre en place des actions pour continuer à produire dans ce contexte climatique tout en limitant les émissions de gaz à effet de serre. C'est également de répondre aux enjeux du développement durable en productions animales et végétales en utilisant les moyens de l'agro-écologie tout en restant en phase avec la demande du consommateur. Ce projet pluridisciplinaire s'inscrit dans une vision globale de l'agriculture dans le but de maintenir les territoires attractifs grâce à des fermes productives et viables. L'ambition du GIEE est de favoriser la complémentarité plaine-montagne et la solidarité entre zones de production animale et végétale par des échanges de pratiques, la transhumance, et le tutorat, développer la diversification agricole comme facteur de résilience des fermes et enfin diffuser, vulgariser, communiquer et sensibiliser.



Crédit photo : Agrivaleur



CROCC_2021

PARTIE
ACTIVITÉS





CHAPITRE

8

AGROSYSTEMES

Coordination : Philippe DEBAEKE et Jean-Marc TOUZARD

Rédaction : Mathieu ABELLA, Lionel ALLETTO, Charlotte CHAMBERT, Luc CHAMPOLIVIER, Julie CONSTANTIN, David Camillo CORRALES, Elana DAYOUB, Philippe DEBAEKE, Valentin DEREMETZ, Sylvain DOUBLET, Christian GARY, Simon GIULIANO, Nina GRAVELINE, Hervé HANNIN, Laure HOSSARD, Etienne-Pascal JOURNET, Jay-Ram LAMICHHANE, Amandine LURETTE, Aurélie MADRID, Pierre MAURY, Nicolas METAYER, Charles-Henri MOULIN, Audrey NAULLEAU, Nathalie OLLAT, Boris PARENT, Laurent PRÉVOT, Hélène RAYNAL, Marie-Hélène ROBIN, Céline SCHOVING, Fabien STARK, François TARDIEU, Vincent THÉNARD, Jean-Marc TOUZARD, Manuella VAN MUNSTER, Denis VILE, Florence VOLAIRE, Claude WELCKER, Magali WILLAUME.

Introduction

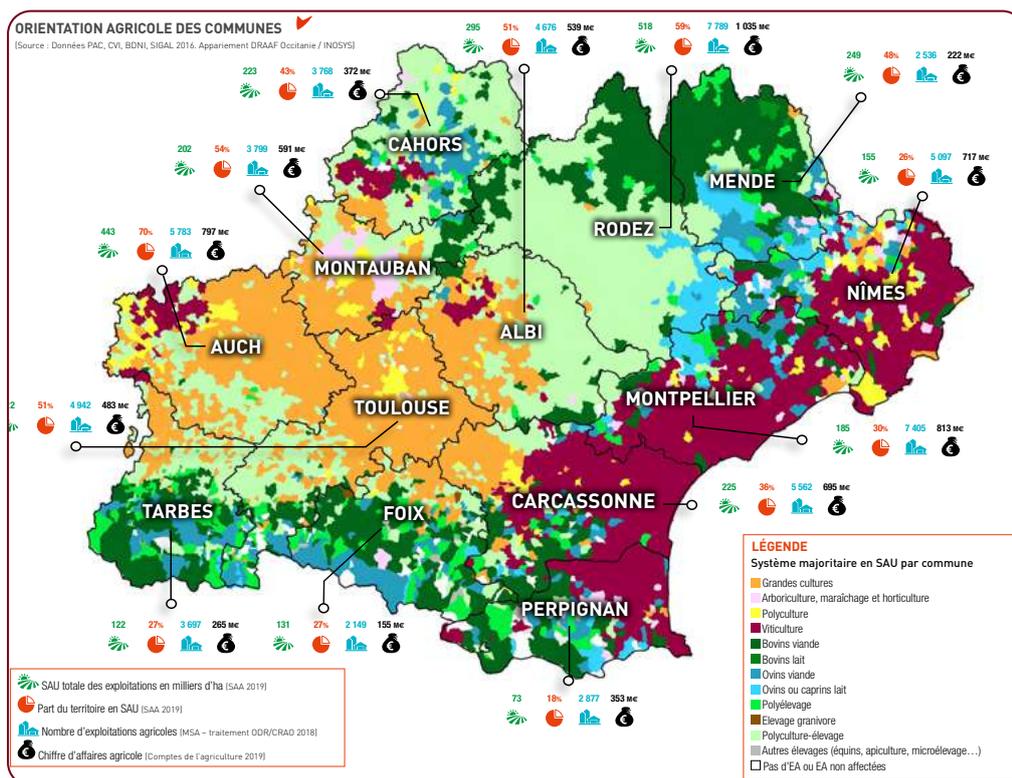
Philippe DEBAEKE (INRAE - AGIR), Jean-Marc TOUZARD (INRAE - Innovations)

Les activités agricoles sont à la fois très impactées par le changement climatique, fortement émettrices de gaz à effet de serre et porteuses de solutions pour atténuer ces émissions et stocker du carbone. En Occitanie, l'accentuation et l'extension du climat méditerranéen, couplées à une intensification des événements extrêmes, fragilisent une agriculture très orientée vers des filières de qualité, notamment AOP (appellation d'origine protégée) ou AB (agriculture biologique). Les rendements des cultures ou la biomasse des prairies et des parcours sont en effet affectés par des contraintes hydriques et thermiques plus fortes sur les périodes végétative et reproductrice. La composition des graines, des fruits et des feuilles se modifie aussi, pouvant remettre en question une qualité recherchée par les transformateurs ou les consommateurs, à l'image des vins devenus plus alcoolisés et moins acides.

C'est globalement la compétitivité d'une agriculture très contrastée (intensive et souvent irriguée en plaine vs extensive sur coteaux et montagnes) qui est en jeu, mais aussi sa capacité à répondre aux demandes urbaines d'une alimentation plus locale, et à assurer ses fonctions de gestion de l'espace rural y compris, par exemple, pour réduire les risques d'incendie accrus par le changement climatique. L'agriculture d'Occitanie contribue aux émissions de gaz à effet de serre, mais sans doute de manière moins importante (par unité de surface) que d'autres régions françaises du fait d'une plus faible proportion de systèmes intensifs d'élevage

et de cultures consommatrices en intrants. La diminution de ces émissions et la compensation par la capture accrue de carbone est pour autant un impératif, en phase avec l'engagement français de réduire de 46 % les émissions du secteur agricole d'ici 2050. Que ce soit à travers la conservation des sols, l'introduction de légumineuses, les modifications des pratiques d'élevage, les économies d'énergie, la limitation des gaspillages ou de la logistique, les leviers sont multiples et déjà testés et engagés dans de nombreuses filières...

En même temps, les situations diversifiées d'Occitanie offrent un large éventail de pratiques adaptatives et de connaissances qui peuvent être sources de résilience, de partages d'expériences, de co-construction de solutions avec les chercheurs, d'analyses ou expérimentations comparées. Les zones climatiquement plus contraintes préfigurent des situations qui seront affectées par le changement climatique, constituant ainsi des zones d'étude privilégiées. Les différents systèmes, espaces et filières de l'agriculture d'Occitanie sont engagés dans une lutte contre le changement climatique, accompagnés en cela par les chercheurs, les collectivités locales, les instituts techniques et organisations agricoles. Évaluer les impacts, préciser les conditions de l'atténuation et explorer les leviers et stratégies d'adaptation suppose création et partage de nouvelles connaissances. C'est un des axes importants des recherches conduites dans les centres Inrae de Toulouse et Montpellier où de nombreuses équipes et disciplines sont impliquées.



Carte 8.A. Les territoires agricoles de la région Occitanie. (Source : Agri'scopie, 2021).

Pour ce chapitre Agrosystèmes, nous avons choisi de présenter les travaux pour trois grands systèmes de production agricole qui marquent les espaces et l'histoire de la région Occitanie :

- 1) Les systèmes d'élevage, qui occupent majoritairement les espaces de collines et montagnes et dont la résilience est liée à la gestion des ressources fourragères ou de nouvelles relations entre polyculture et élevage ;
- 2) les systèmes de grandes cultures (céréales, oléo-

protéagineux...) très implantés dans les plaines et cotaux de l'ouest de l'Occitanie et où l'on doit revoir les choix de variétés et de pratiques pour améliorer la tolérance à la sécheresse mais aussi reconcevoir une gestion de l'eau plus durable ;

- 3) la viticulture qui occupe avant tout les plaines et cotaux (déjà) méditerranéens et a très tôt exploré des leviers d'adaptation (cépage, mode de conduite, irrigation, relocalisation...) qu'elle cherche aujourd'hui à intégrer, avec les chercheurs, dans de nouveaux systèmes et stratégies à plusieurs échelles.

1. SYSTÈMES D'ÉLEVAGE

1.1 Gérer les ressources fourragères et assurer la durabilité et la résilience des systèmes d'élevages

Dormir en été ou mourir : comment les graminées pérennes survivent aux sécheresses méditerranéennes

Florence VOLAIRE (INRAE - CEFE)

Les prairies naturelles, les parcours pâturés, certaines cultures fourragères et les pelouses ornementales sont constitués majoritairement de graminées pluriannuelles. Dans nos régions et sans irrigation, comment ces espèces peuvent-elles survivre à de fortes sécheresses estivales qui sont de plus en plus sévères ? Contrairement aux espèces annuelles qui produisent leurs graines au printemps et évitent ainsi l'été, les espèces pérennes herbacées mettent en œuvre trois stratégies principales pour se perpétuer sur plusieurs années (Volaire, 2018).

La première stratégie est d'éviter de se déshydrater notamment en allant chercher de l'eau dans le sol en profondeur avec un système racinaire efficace. Mais cela n'est possible que tant que l'eau est disponible en conditions de sécheresse modérée. Puis, quand la sécheresse s'intensifie, les plantes doivent tolérer la déshydratation. Cette seconde stratégie est plus développée chez les populations méditerranéennes que chez les populations d'origine tempérée. Nous avons montré que chez le dactyle et la fétuque (Poirier et al., 2012), les populations tempérées présentaient de la mortalité à partir de déficit climatique, c'est-à-dire une différence entre les précipitations et l'évapotranspiration de mai à septembre d'environ 450 mm sur sols profonds, et probablement bien moins sur sols plus superficiels (figure 8.1). De plus, les populations des régions méditerranéennes semi-arides (Maroc, Californie) présentent une stratégie encore plus efficace, c'est la dormance estivale qui leur permet de tolérer la déshydratation pendant plusieurs mois (Volaire et Norton, 2006).

Cette stratégie est peu connue mais correspond à l'inverse de la dormance hivernale qui se caractérise par la chute automnale des feuilles des arbres pour permettre à ces espèces de tolérer ensuite le gel hivernal (qui est

aussi une déshydratation). Dans les deux cas, la dormance est induite par la photopériode et la température. On mesure la dormance estivale comme la capacité des plantes à ne pas pousser et dans le cas de dormance complète, à se dessécher même sous irrigation estivale. Nous montrons que cette stratégie illustre le compromis entre capacité à investir dans la croissance et la capacité à survivre au stress (Keep et al., 2021). Pour la majorité des organismes vivants en effet, se mettre en repos, économiser son énergie est la meilleure façon de survivre à la plupart des stress du milieu. La dormance permet d'anticiper les stress et de les surmonter au mieux. Cette stratégie a un grand intérêt écologique et agronomique pour la survie à des sécheresses plus intenses en été.

Avec des collègues généticiens (INRAE Lusignan), nous avons montré que cette dormance estivale est en fait présente chez les populations méditerranéennes de deux espèces très répandues en Europe, le ray-grass anglais et le dactyle. En collaboration avec des firmes de semences nationales, nous menons un projet pour développer de nouvelles variétés de dactyle qui présentent une gamme de dormance estivale mais aussi une bonne productivité de biomasse fourragère aux autres saisons plus pluvieuses (projet CASDAR Dactysec). En effet, et encore actuellement, la plupart des variétés de ces espèces présentes sur le marché des semences ont été sélectionnées pour les grandes régions d'élevage en zones tempérées et vont être de moins en moins pérennes. Vu que le climat européen tend vers une « méditerranéisation », les adaptations des espèces sous nos latitudes doivent être étudiées et valorisées (Norton et al., 2016) car elles sont susceptibles de permettre l'adaptation aux conditions plus drastiques qui vont sévir beaucoup plus largement dans un proche avenir sous réchauffement climatique.

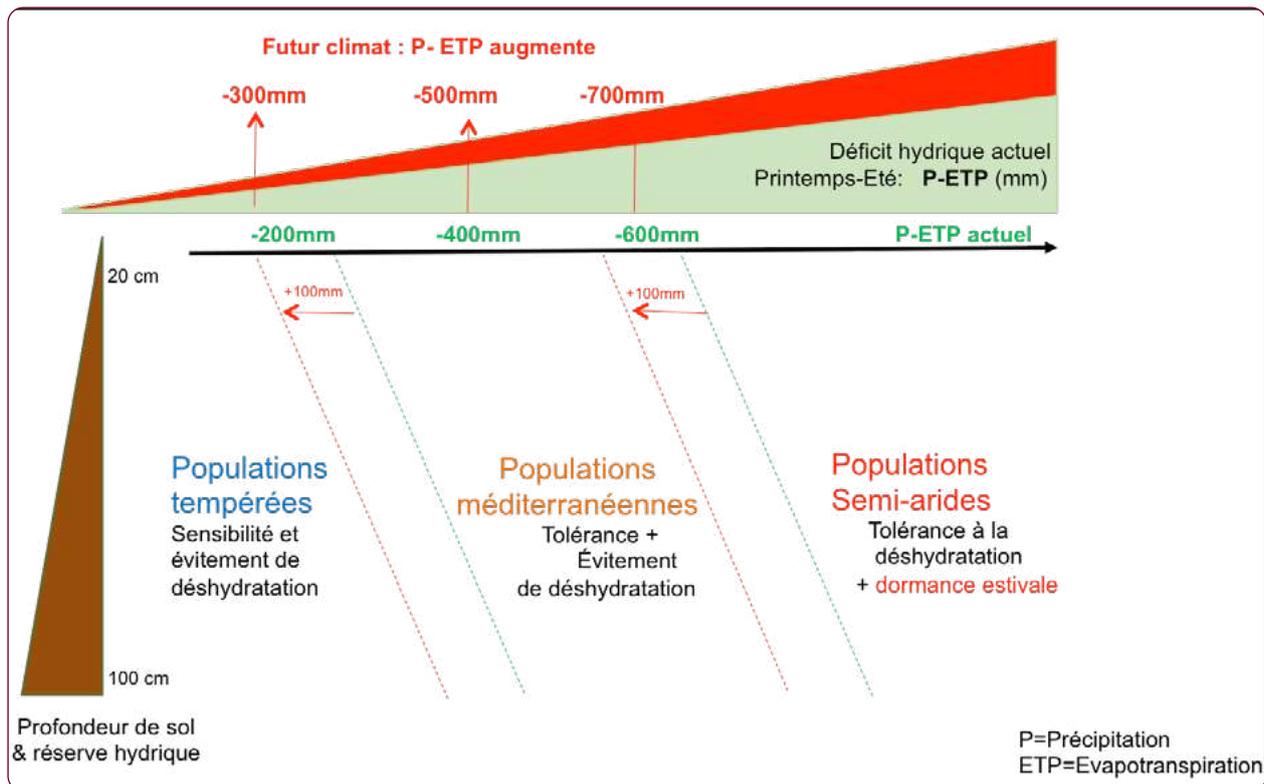


Figure 8.1. Zones d'adaptation des graminées pérennes selon le déficit hydrique présent et futur sous changement climatique en fonction de la disponibilité hydrique des sols. Du fait de leur faible tolérance à la déshydratation, les populations tempérées seront moins pérennes et donc moins adaptées. Les populations d'origine méditerranéenne et semi-arides seront par contre de plus en plus adaptées car leurs stratégies de tolérance à la déshydratation et/ou de dormance estivale leur permettent une plus grande résilience sous sécheresses croissantes.

(Source : F. Volaire)

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Régénérer l'écosystème pour plus de résilience alimentaire (Reforestation, Permaculture et Transition alimentaire) - 11

Cap-Heol - [En savoir plus](#)

La reforestation, la permaculture et la transition vers une alimentation plus végétale et locale sont des clés pour ralentir le dérèglement climatique. C'est pourquoi, sur des terres en friche, incendiées il y a une dizaine d'années, sèches, rocailleuses et abritant peu de vie micro-organique, des citoyens regroupés en association initient depuis 2018 la régénération de l'écosystème : expérimentation de la permaculture végétale, création d'une forêt nourricière, plantation et semis de plusieurs centaines d'espèces et de variétés champêtres, fruitières, potagères, fertilisantes, mellifères, aromatiques et médicinales. Ces réalisations contribuent à la protection de la biodiversité, au stockage du carbone et de l'eau de pluie, à la prévention des incendies, etc. Elles visent plus d'autonomie et de résilience alimentaire du territoire et serviront aussi de support à la sensibilisation et la formation dans les domaines de la permaculture et de l'alimentation végétale moins émettrice de gaz à effet de serre.



Crédit photo : Cap-Heol

projet qui s'inscrit dans
une logique de
Sain

Accompagner l'adaptation des systèmes fourragers au changement climatique : identifier des leviers d'adaptation et créer un outil pour les éleveurs, les conseillers, les étudiants

Vincent THÉNARD (INRAE - AGIR)

Les premiers effets du changement climatique sont déjà visibles dans les exploitations d'élevage d'Occitanie. L'émergence d'aléas climatiques de plus en plus fréquents conduit les éleveurs à devoir adapter leurs systèmes fourragers pour préserver la pérennité de leur exploitation. Au cours du projet Mélibio (2014-2019), le Pôle AB Massif central, l'ITAB, l'INRAE et des conseillers agricoles ont mis au point une démarche d'accompagnement pour identifier les leviers d'adaptation. Ces leviers, directement actionnables par les éleveurs, visent à renforcer l'autonomie de leur élevage.

A partir d'enquêtes exploratoires, en zones méditerranéennes où des éleveurs développent déjà des stratégies d'adaptation et des ateliers participatifs menés dans le sud du Massif central en Occitanie, de nouveaux leviers d'action ont été identifiés et testés pour renforcer l'autonomie fourragère des élevages face à des aléas climatiques futurs. Au final, ce travail a conduit à élaborer un jeu de cartes des leviers d'autonomie pour accompagner des éleveurs et des étudiants dans leur réflexion sur l'adaptation des systèmes fourragers au changement climatique.

L'influence méditerranéenne sera plus forte en 2050 dans le Massif central

La simulation à l'échelle régionale fait apparaître des différences entre zones du Massif central mais, globalement, le climat verrait un réchauffement d'ici 2050 de quelques degrés (+1,5 °C à +2 °C), en particulier en région Occitanie. Les précipitations annuelles devraient peu changer mais leurs répartitions se modifier : au-dessous de 600 m, elles seraient davantage groupées au printemps et en automne, parfois sous forme d'orage avec de fortes pluies concentrées sur quelques jours seulement (AP3C, 2018). Cette évolution correspondrait à une remontée vers le nord du climat « méditerranéen subhumide » laissant place à des étés plus chauds et plus secs avec un ensoleillement important, et une hausse de l'évapotranspiration, augmentant les besoins en eau de la végétation.

Des éleveurs de Toscane et de Catalogne déjà contraints de s'adapter aux sécheresses estivales

Aujourd'hui, dans deux régions méditerranéennes, la Toscane et la Catalogne, les éleveurs développent déjà des stratégies d'adaptation face à la sécheresse. Le climat actuel est similaire à ce qu'il pourrait être en 2050, dans le sud du Massif central en Occitanie. À partir d'enquêtes auprès d'éleveurs et de conseillers agricoles, nous avons ainsi identifié quatre stratégies : 1) des producteurs de lait de vache en système intensif utilisent

peu le pâturage et irriguent les cultures fourragères ; 2) des producteurs de lait de brebis pour produire du fromage sous AOP « Pecorino Toscano » cultivent la luzerne combinée à du pâturage de prairies diversifiées ; 3) des producteurs de viande développent de nombreuses cultures fourragères, notamment d'hiver afin de profiter des pluies hivernales et constituer des stocks ; 4) des éleveurs de brouillards valorisent les prairies permanentes de montagne associées à des cultures variées et irriguées. Ainsi les leviers d'adaptation développés aujourd'hui sont agronomiques (choix d'espèces, cultures adaptées) ou techniques (stock, irrigation) (Thénard et al., 2015).

Tester en ateliers participatifs de nouveaux leviers d'adaptation aux aléas climatiques futurs

Pour un éleveur, dans cette période de transformation du climat, il est essentiel de s'adapter aux aléas climatiques. Lors d'ateliers participatifs (éleveurs, conseillers, chercheurs), nous avons identifié, testé et évalué les leviers les plus pertinents permettant à des éleveurs d'Occitanie de se préparer au changement climatique. Ces ateliers ont été conduits dans deux zones du nord de l'Occitanie (Tarn et Aveyron) : des éleveurs de vaches laitières dans les coteaux de l'Albigeois (81), déjà habitués à des sécheresses estivales proposent de diversifier leurs cultures (cultures à double fin, luzerne...) et envisagent d'irriguer les prairies. Les aléas de sécheresse ou au contraire de pluies trop abondantes au printemps impliquent de raisonner « en temps réel » et d'adapter le système fourrager en misant sur la diversité des cultures.

En revanche, des éleveurs de brebis laitière des Causses (12) font face à des sécheresses d'été importantes sur des sols pauvres et très séchant : pour eux l'adaptation par de nouvelles cultures est difficile. Ce groupe d'éleveurs vise la sécurisation du système par l'achat de fourrage, permise par un prix du lait attractif. Au cours de ces ateliers nous avons constaté la pertinence des leviers identifiés en Toscane et Catalogne pour s'adapter à la sécheresse en fonction des conditions de milieu et des types de production agricoles (Cliozier, 2018).

Un jeu sérieux pour favoriser les échanges entre éleveurs et conseillers agricoles et former les étudiants

Lors du projet MELIBIO, des leviers d'adaptation des systèmes fourragers ont été identifiés, ce fut aussi le cas dans un autre projet (CASDAR OPTIALIBIO). Les partenaires de ces deux projets (le Pôle AB Massif central, l'ITAB, l'IDELE et l'INRAE) ont décidé de valoriser ces résultats, sous forme d'un jeu de cartes, simple.

Ainsi est né « LAURACLE, 40 leviers pour l'autonomie fourragère » (figure 8.2). Le jeu repose sur la description d'une quarantaine de cartes leviers d'adaptation. Cette description présente les avantages et inconvénients de leurs mises en œuvre. Ce jeu sérieux vise à répondre aux besoins du conseil en élevage, favorise les échanges

entre éleveurs et conseillers agricoles, et envisage des voies d'adaptation au réchauffement climatique des systèmes fourragers. Il a aussi été utilisé lors de sessions de formation d'étudiants en agronomie (Thénard, 2021). Ce jeu est téléchargeable sur le site [Mélilibio](http://Melibio.com).



Figure 8.2. Etude climatique, enquêtes en élevage et ateliers de conception ont permis la création d'un jeu de cartes LAURACLE pour envisager l'adaptation des systèmes fourragers face au changement climatique en Occitanie. (Source : Thénard, 2021)

Les systèmes d'élevage d'Occitanie face au changement climatique : quels leviers d'adaptations ?

Fabien STARK (INRAE – PASTO), Amandine LURETTE (INRAE – PASTO), Aurélie MADRID (IDELE), Charles-Henri MOULIN (AGRO – SELMET)

Le changement climatique a des effets directs sur la composante animale des systèmes d'élevage, mais également sur les ressources alimentaires (figure 8.3). L'élevage d'Occitanie est et sera fortement impacté par le changement climatique, compte tenu des modes de conduite des systèmes d'élevage de la Région. En effet, avec près d'un tiers des surfaces agricoles d'Occitanie classé en surface toujours en herbe (STH, Agreste 2021), l'élevage régional, principalement ruminant, repose en partie sur le pâturage de surfaces pastorales (pelouses, landes, bois), notamment à l'est, mais également sur une diversité de ressources fourragères : prairies permanentes, prairies temporaires, cultures fourragères... Ces différentes surfaces sont et seront affectées par le changement climatique, de façon plus ou moins marquée.

En particulier, dans le cas des surfaces pastorales, qui sont composées de végétation spontanée, sur des terres non labourables, sans possibilité de fertilisation

ni d'irrigation, les possibilités « directes » d'en atténuer les effets sont limitées. Les ressources alimentaires cultivées sont également impactées, avec une baisse du rendement des prairies temporaires par exemple. Pour autant, plusieurs leviers sont mobilisables par les éleveurs pour faire face aux effets du changement climatique sur leurs systèmes d'élevage : gestion des ressources fourragères, gestion du troupeau, espèces cultivées, race et composition des troupeaux.

Dans le cadre de travaux de recherche menés au sein de l'UMR SELMET (Unité mixte de recherche systèmes d'élevages méditerranéens et tropicaux) et dans le cadre de l'UMT PASTO (Unité mixte et technologique ressources et transformations des élevages pastoraux en territoires méditerranéens), certains de ces leviers sont ainsi étudiés pour essayer d'apporter des solutions aux préoccupations des éleveurs.

Le projet Agrosyl (GOPEI, 2016-2020), porté par la chambre départementale de l'Ariège, en partenariat avec l'UMR Selmet, l'Idede et le CNPF, s'est ainsi attaché à tester certaines pratiques sylvopastorales pour accompagner l'évolution des systèmes herbagers pyrénéens vers une meilleure résilience face au changement climatique. Ces travaux ont notamment permis d'explorer certaines pratiques prometteuses tel que l'introduction de banques fourragères arbustives de type murier blanc pour disposer d'un fourrage vert et pérenne en période estivale, ou encore la mise en place d'éclaircies sylvopastorales pour favoriser la pousse de l'herbe et le pâturage par les ruminants.

Le projet AdaptHerd (PRIMA, 2019-2023), est quant à lui un projet de recherche international associant plusieurs organismes de recherche du pourtour méditerranéen (Espagne, Tunisie, Egypte), et concerne plus spécifiquement les modes de conduite pour améliorer la résilience et l'efficacité des troupeaux en fonction de la capacité d'adaptation des petits ruminants. Concernant les situations françaises (élevage ovin viande méditerranéen), il s'agira de s'appuyer sur les stratégies d'adaptation au changement climatique mises en œuvre par les éleveurs, pour concevoir différents scénarios d'adaptation des éleveurs au changement climatique. Les scénarios envisagés mobiliseront différents leviers tels que la période de pâturage, l'allotement et l'implantation de cultures fourragères. Un modèle de simulation permettra aux partenaires du projet de tester l'impact de différentes stratégies d'adaptation sur les performances des systèmes d'élevage concernés, en fonction des contextes d'étude.

Le projet LiveAdapt (Life 2018-2022) est également un projet européen associant des partenaires espagnols, portugais et français autour de l'adaptation au changement climatique. Dans ce cadre, des fiches techniques de présentation de leviers d'adaptation sont en cours de rédaction. Une enquête en ligne visant à recueillir la perception du changement climatique et les mesures d'adaptation mises en œuvre est ouverte dans les trois pays. En France, des entretiens menés avec une vingtaine d'éleveurs ovins viande du Sud-Ouest (Tarn et Lot principalement) en 2020 ont montré que les éleveurs mobilisent déjà de nombreux leviers, en matière de gestion des surfaces fourragères ou de conduite du troupeau. Des ateliers menés avec des éleveurs pastoraux du Larzac autour de l'outil Rami pastoral ont mis en avant la complémentarité des différents types de ressources fourragères et l'importance d'une bonne gestion de ces ressources au fil de l'année.

Même si le changement climatique a et aura un impact non négligeable sur les ressources naturelles et sur l'agriculture en particulier, les éleveurs d'Occitanie sont déjà habitués à composer avec un climat changeant. Ceux qui mobilisent des surfaces pastorales, avec des ressources alimentaires disponibles et accessibles uniquement à certains endroits et à certains moments de l'année (estives par exemple), sont par nature en perpétuelle adaptation face aux changements de leur environnement. Les savoir-faire de ces éleveurs pour mobiliser une diversité de ressources, à la fois spontanées et cultivées, leur permet de s'adapter aux changements et aléas climatiques, passés et à venir.

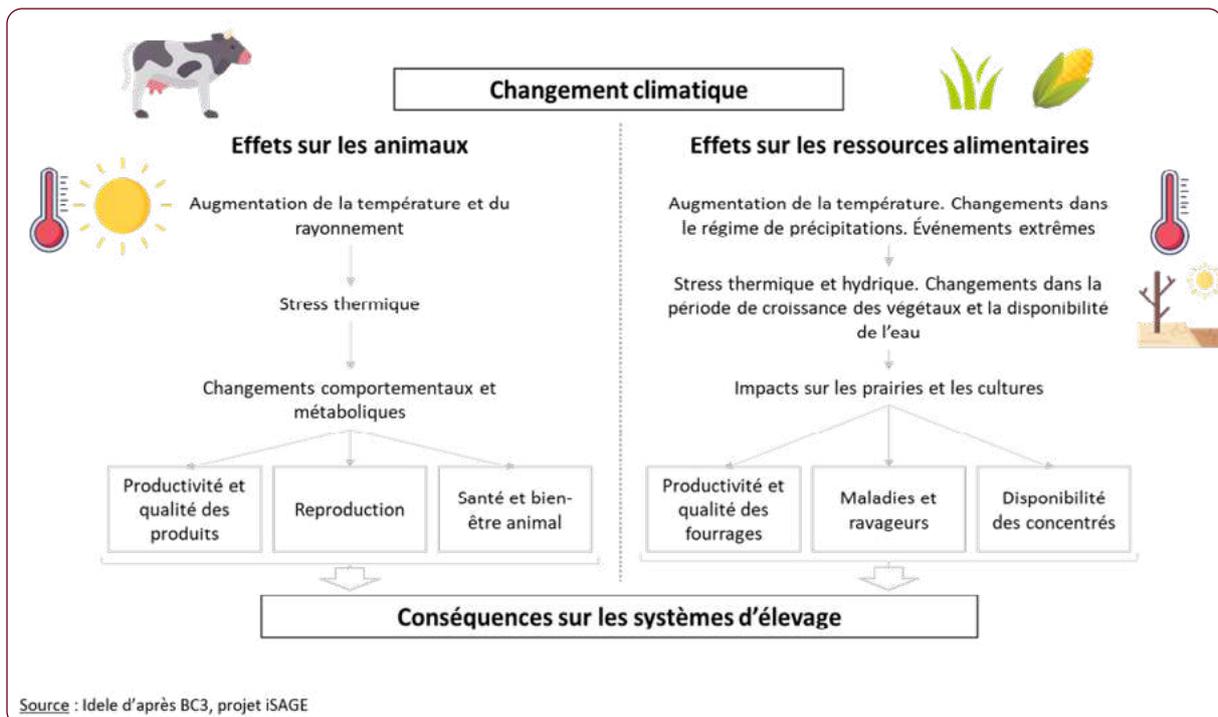


Figure 8.3. Effets du changement climatique sur les animaux et les ressources alimentaires composant les systèmes d'élevage. (Source : Idele d'après BC3, projet iSAGE)

1.2 Gestion du risque climatique dans les exploitations de polyculture et d'élevage

L'adaptation durable des systèmes agricoles au changement climatique

Nicolas MÉTAYER (Solagro), Sylvain DOUBLET (Solagro),

Solagro est une association au service des transitions énergétique, agroécologique et alimentaire.

Risques climatiques à venir, indicateurs et mesures d'adaptation

Avec trois partenaires européens (Bodensee Stiftung, Fundacion Global Nature et Eesti Maaülikool -Estonian University of Life Sciences), Solagro a développé une [plateforme](#) web en libre accès pour permettre aux acteurs agricoles de renforcer leurs connaissances en matière de vulnérabilité et d'adaptation au changement climatique. Dans le cadre du projet LIFE AgriAdapt, 126 fermes pilotes ont été étudiées en Europe, dont 34 en France et 15 en Occitanie.

L'Occitanie, comme la partie méditerranéenne de l'Europe, est soumise à des problématiques de baisse de la disponibilité en eau, de la durée du cycle cultural et des rendements et de diminution des zones favorables aux cultures. Elle est impactée par une hausse des risques de sécheresse et d'érosion des sols. Les indicateurs utilisés pour mesurer ces changements intègrent notamment des données agronomiques (relatives aux rendements) et climatiques (à partir d'observations sur les 30 années passées et de projections pour les 30 années à venir). Sur cette base, des mesures d'adaptation ont été proposées à plus ou moins court terme ([figure 8.4](#)).

Le cas d'une ferme d'élevage dans le Tarn

Solagro a étudié le cas d'une ferme d'élevage avec 240 vaches laitières et 80 vaches à viande. Cette exploitation possède 360 ha, dont 145 ha consacrés aux prairies permanentes, le reste des surfaces étant consacré au maïs ensilage irrigué, méteil, blé tendre et prairies temporaires. 170 000 m³ d'eau par an sont déjà utilisés pour l'irrigation. L'autosuffisance en fourrages est assurée mais le stress hydrique menace de diminuer à terme la quantité de biomasse produite. Enfin, cette ferme d'élevage a récemment mis en place une unité de méthanisation. Les projections climatiques à l'horizon 2035 indiquent une baisse des précipitations (-6 % par an, -66 mm en été), une augmentation des températures, un déficit en eau plus élevé (+24 %) et un doublement du nombre de vagues de chaleur.

Pour minimiser les impacts du changement climatique, des mesures d'adaptation sont possibles :

- réduire ou supprimer progressivement le cheptel bovin viande pour sécuriser les besoins en fourrage des vaches laitières ;
- optimiser l'utilisation des digestats comme fertilisant et diversifier les revenus de la ferme par la vente d'énergie via l'unité de méthanisation. Les cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) permettent également d'éviter les sols nus, les protégeant de l'érosion et améliorant leur fertilité (stockage additionnel de carbone) ;
- introduire progressivement du sorgho fourrager en substitution au maïs ensilage irrigué. Les économies d'eau d'irrigation peuvent permettre de couvrir les besoins en eau des cultures céréalières, pour sécuriser les niveaux de rendement et limiter la dépendance vis-à-vis des achats extérieurs ;
- substituer une partie du blé tendre par du méteil, pour une alimentation du troupeau plus riche en protéines ;
- améliorer le confort thermique des vaches dans les bâtiments (brasseurs d'air, ventilateurs, systèmes de brumisateurs), pour réduire l'impact des vagues de chaleur estivales sur les animaux, et ainsi limiter les pertes de lait et la baisse de fertilité.

Le projet LIFE AgriAdapt s'inscrit dans des enjeux de long terme. La méthodologie mise en place permet, sur la base d'indicateurs locaux, d'envisager une multiplicité de pistes d'adaptation. L'ensemble des co-bénéfices (sociaux, économiques, environnementaux) liés à leur mise en œuvre sont pris en compte. L'adaptation est un mouvement continu, les pratiques doivent être réinterrogées régulièrement. Avec l'ensemble des ressources et outils en libre accès, Solagro participe à la diffusion et au partage de ces enseignements auprès des conseillers agricoles et des agriculteurs.



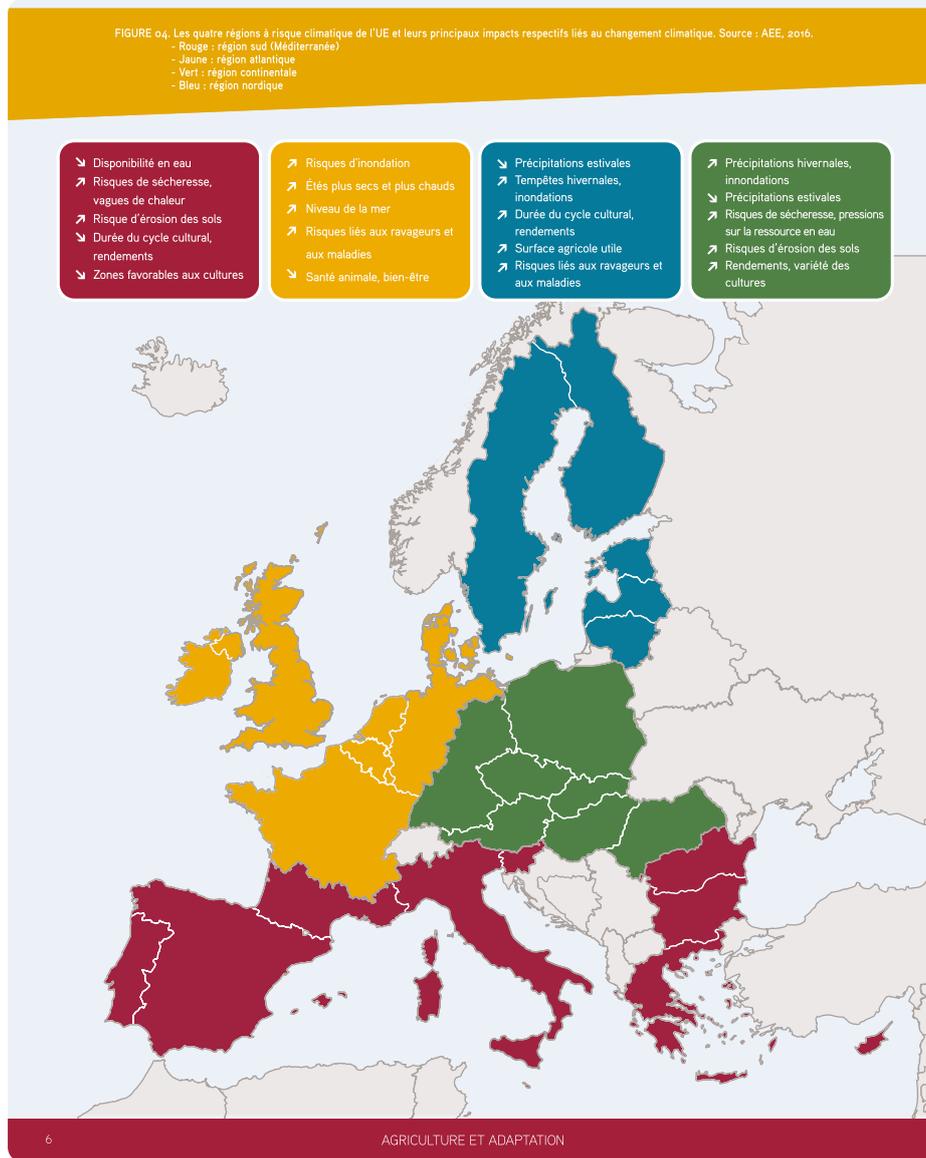


Figure 8.4. Principaux risques climatiques pour l'agriculture européenne. (Source : Solagro, 2020 - projet LIFE AgriAdapt)

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Un jardin-forêt nourricier et pédagogique adapté au climat local - 11

Phacélie - *En savoir plus*

La raison d'être de l'association « Phacélie, agir pour la biodiversité » s'articule autour de 3 axes qui se nourrissent et s'enrichissent mutuellement :

- agir pour la biodiversité et la protection de l'environnement ;
- cultiver le végétal de manière expérimentale en harmonie avec la nature et adaptée à notre climat méditerranéen ;
- partager et essayer nos expériences et observations
- grâce à l'éducation à l'environnement.

En s'inspirant des principes de la permaculture et de l'agro-écologie, l'association crée et développe un jardin-forêt nourricier sur Fitou qui a un rôle de refuge de biodiversité et comprend une mosaïque d'écosystèmes (haies et guildes champêtres, espèces nourricières et mellifères, potager, zones de friche naturelle, mare de biodiversité...).

Afin de partager ses retours d'expérience, l'association anime des ateliers en lien avec la nature, la biodiversité, l'éveil des sens, l'éducation à l'environnement, l'alimentation durable, etc., en utilisant le jardin-forêt comme lieu d'expérimentation et comme outil pédagogique. L'association propose également des semences, plants et essaims d'abeilles sauvages issus du jardin-forêt et donc adaptés au climat local.



Crédit photo : Phacélie

Croiser les connaissances pour concevoir collectivement des solutions d'adaptation au changement climatique

Aurélie MADRID (IDELE)

Face au changement climatique qui affecte les animaux directement mais également la disponibilité des ressources alimentaires, la nécessaire adaptation des systèmes d'élevage et de polyculture-élevage passe par la mise en relation de divers domaines de connaissances (climatiques, agronomiques, zootechniques...) croisés avec l'expérience des éleveurs.

Une première étape consiste à se rendre compte des changements passés et à « savoir de quoi le futur sera fait ». La mise en évidence des évolutions climatiques observées et les résultats des travaux de projection menés par la communauté climatique sont des ressources précieuses sur lesquelles se construisent plusieurs outils et projets, tels que ceux des Chambres d'agriculture (Oracle et ClimA-XXI). Les données issues de ces travaux sont souvent valorisées sous forme d'indicateurs, permettant d'évaluer les impacts des évolutions climatiques sur les plantes ou les animaux.

Par exemple, il est possible de suivre l'évolution de la date d'atteinte du stade floraison (pour une culture) ou de la date de mise à l'herbe (pour une prairie) ou encore l'évolution du nombre de jours de stress thermique (pour les animaux d'élevage). Ces indicateurs peuvent être calculés sur des données historiques ou des données projetées. Ils ne permettent cependant pas de mettre en évidence l'effet cumulé de plusieurs paramètres climatiques.

Les travaux autour de la résilience des espèces végétales et animales face au changement climatique (cf. **partie 1**) viennent également alimenter la réflexion collective. Il s'agit de mieux comprendre comment les évolutions du climat affectent les différentes composantes des systèmes d'élevage, afin d'identifier les voies d'adaptation possibles. Les outils de modélisation peuvent alors venir en renfort pour évaluer l'impact du changement climatique (ou l'impact d'aléas climatiques), notamment en simulant la croissance des prairies et cultures fourragères dans le climat attendu pour le futur, grâce à des modèles de cultures.

Sur le terrain, agriculteurs et éleveurs expérimentent année après année de nouvelles conditions climatiques. Face à cela, ils adaptent leurs systèmes fourragers mais également la conduite de leurs troupeaux et confrontent ainsi l'adaptation au changement climatique aux nombreux autres enjeux auxquels font face les élevages et les filières. Par exemple, 22 éleveurs ovins viande du Sud-Ouest témoignent de l'adaptation de leurs pratiques au changement climatique dans le cadre du projet Life [LiveAdapt](#), travail par ailleurs similaire en cours côté Sud-Est dans le cadre du projet [AdaptHerd](#).

Des outils pour faciliter l'échange entre différents acteurs

Le projet [Climalait](#), mené à l'échelle d'une vingtaine de petites régions françaises, dont les [coteaux du Tarn](#) pour la région Occitanie, s'est appuyé sur ces différentes compétences pour travailler collectivement sur l'adaptation des systèmes laitiers face au changement climatique. Dans chaque zone, les données issues des modèles de climat ont permis de visualiser les futurs possibles et d'alimenter un modèle de culture ([STICS](#)) afin d'évaluer leurs conséquences sur les prairies et cultures fourragères. Ces résultats étaient ensuite intégrés dans un jeu de plateau associé à un module informatique, le [Rami fourrager®](#), qui servait de support à une réflexion entre éleveurs et conseillers sur l'adaptation des systèmes laitiers face au changement climatique.

Pour les systèmes pastoraux, un [Rami pastoral](#) existe également, qui permet notamment de confronter un système d'élevage valorisant des ressources pastorales à des aléas climatiques saisonniers (baisse de production fourragère sur une ou plusieurs saisons ou décalage des dates de début et/ou fin de ces « saisons »). Le système étudié était constitué de 50 vaches sur 100 ha (dont 48 ha de surfaces dédiées à l'alimentation du troupeau). Il a été adapté à un futur moyen puis confronté à une succession d'aléas climatiques (printemps pluvieux suivi d'une forte sécheresse estivale).

Différents leviers ont été évoqués par les participants : luzerne, cultures intermédiaires et cultures à double fin (grain ou ensilage) sur le plan fourrager ; ajustement des périodes de mise bas, adaptation de la génétique du troupeau et adaptation des bâtiments sur le plan du troupeau.



Photo. Bergère salariée conduisant un troupeau de brebis sur des parcours boisés soumis au risque d'incendie.
(Source : M. Meuret)

2. GRANDE CULTURE

2.1 Comprendre et améliorer la tolérance à la sécheresse des grandes cultures en Occitanie

La variété du futur, tolérante à la sécheresse ? Un ensemble de variétés adaptées aux scénarios de sécheresse locaux

Boris PARENT (INRAE – LEPSE), Claude WELCKER (INRAE – LEPSE), François TARDIEU (INRAE – LEPSE)

UNE ou DES tolérance(s) à la sécheresse ?

Le changement climatique augmente la fréquence des épisodes de sécheresse du sol, souvent combinés à de fortes températures et une forte demande évaporative. La sélection variétale a été jusque-là efficace, avec des progressions observées de l'ordre de +1 % de rendement par an chez la plupart des grandes cultures, même pour des conditions de sécheresse. Cependant, chez la plupart des céréales, on observe une stabilisation des rendements en France et à l'échelle européenne depuis 2010 ainsi qu'une augmentation des oscillations interannuelles de la production agricole, principalement dû à la multiplicité des scénarios de sécheresses. Il est donc urgent de développer rapidement de nouvelles variétés plus économes en eau adaptées aux spécificités agronomiques et climatiques locales.

Répondre à ce besoin est pourtant loin d'être élémentaire. En effet, le changement climatique a tendance à faire fortement varier la performance relative d'une variété par rapport à une autre. Il en résulte qu'il est très difficile de préjuger quelle combinaison de traits physiologiques (caractéristiques génétiques qui caractérisent une variété) sera la plus bénéfique dans tel ou tel environnement, tant ces traits interagissent entre eux. Par exemple, en cas de sécheresse importante, chaque millimètre d'eau économisé pendant les stades précoces du développement de la culture permet d'obtenir un état hydrique du sol plus favorable pendant les stades plus tardifs et très sensibles que sont la floraison et le remplissage du grain.

A l'opposé, en cas de sécheresse modérée, une forte réduction de photosynthèse accompagnant une réduction de la transpiration des plantes ne sera pas compensée pendant le cycle cultural, aboutissant à une faible production de grains. Ainsi, la meilleure variété observée dans un environnement peut être un très mauvais choix dans un scénario de sécheresse différent. Dans le contexte de changement climatique et d'oscillations des performances relatives des variétés, il est donc essentiel d'identifier « où et quand » une combinaison donnée de caractéristiques génétiques peut octroyer de meilleurs rendements.

Des modèles mathématiques pour prédire les performances des variétés présentes et futures

Une approche purement expérimentale, au champ, ne peut pas explorer les conséquences sur le rendement de chaque combinaison de caractères physiologiques dans toute la diversité des scénarios de sécheresse. Une solution consiste à utiliser un modèle mathématique qui prédit les effets de caractères physiologiques dans un plus grand nombre de scénarios environnementaux, pour les conditions climatiques actuelles et futures.

Cette recherche d'« idéotypes » vise à définir la combinaison de ces caractères pouvant donner le meilleur rendement moyen au fil des ans dans une région donnée (exemple sur la précocité en [figure 8.5](#)). Un idéotype dépend forcément de l'objectif spécifique qu'il lui est imposé (p. ex. : meilleur rendement, stabilité des rendements...) et sera différent selon l'environnement et la conduite de culture.

Cette stratégie nécessite donc un modèle de culture capable de prédire l'impact des caractéristiques génétiques des variétés dans des environnements contrastés, combiné à des mesures à large échelle de ces caractéristiques pour un grand nombre de variétés. Cette utilisation de la modélisation est très différente de celle des premiers modèles de cultures qui ont principalement été construits pour prédire les conséquences de différentes conduites culturales et des conditions climatiques sur le rendement (p. ex. : dates de semis, espacement des rangs, irrigation, ou diverses conditions climatiques).

De plus, ces modèles de culture ont été principalement construits sur la base d'une variété « moyenne », idéalement représentative de l'espèce et n'intègrent pas la diversité que l'on peut trouver dans chaque espèce pour chaque caractère physiologique. La prédiction de l'impact de cette diversité sur les performances des plantes nécessite donc de repenser ces modèles en profondeur, de telle sorte qu'ils incluent plus largement cette diversité, et que les valeurs de ces caractères soient mesurables pour des centaines de variétés.

La « Phénomique » permet aujourd'hui de mesurer les caractéristiques physiologiques de centaines de variétés

Pendant des années, le phénotypage (la caractérisation du phénotype, soit d'un/des caractère(s) observable(s) chez un individu), est resté un obstacle majeur en modélisation des cultures et en sélection variétale. Jusqu'à récemment, obtenir un jeu de caractères représentant la variété (le Phéno), pour ne serait-ce que quelques dizaines de variétés était tout simplement impossible, tant l'effort expérimental pouvait être important pour mesurer ces dizaines de valeurs de caractères nécessaires au modèle de culture pour simuler une variété.

Ces 15 dernières années ont été marquées par l'explosion du nombre de plateformes de phénotypage haut-débit, en vue de pouvoir caractériser des phénotypes dynamiques à différentes échelles, de métabolites jusqu'à la croissance de la plante entière en conditions contrôlées (serres, chambres de cultures, ou les conditions environnementales sont imposées), au champ semi-contrôlé (abris roulants, irrigation, imagerie...), et à l'exploitation agricole (télé-détection, drones, réseaux de capteurs... ; **figure 8.6**).

Cependant, dans un premier temps, cette démonstration technologique ne s'est pas transformée automatiquement en données biologiques d'intérêt, tant manquaient des procédures d'analyses de ces données hétérogènes à différents pas de temps. Aujourd'hui, la « Phénomique » végétale est devenue une science à part entière, développant de nouvelles méthodes de traitement et de modélisation des données, pour tirer parti de l'imagerie des plantes à haut débit, des technologies de capteurs, et procurer des ensembles de valeurs de caractères physiologiques sur des centaines de variétés.

Quels traits physiologiques pour les variétés du futur ? Les caractères adaptatifs, de grands oubliés ?

La vision classique de l'amélioration variétale pour la tolérance à la sécheresse est basée sur le compromis entre disponibilité en eau pendant le cycle végétatif (avant la floraison) et pendant le remplissage du grain.

Dans ce cadre, les leviers possibles pour développer de nouvelles variétés adaptées à des épisodes de sécheresse de plus en plus fréquents sont :

1) L'évitement, en jouant sur la précocité des variétés et leur vitesse de développement, afin que la floraison ait lieu avant les épisodes de sécheresse sévère ;

2) La croissance racinaire ;

3) La modération de la transpiration des plantes.

Cependant, la caractérisation de ces caractères clefs (dynamique de croissance racinaire et foliaire, contrôle temporel de la transpiration...) est très difficile à une échelle temporelle fine (minutes à heures), et les chercheurs ont donc eu tendance à travailler principalement sur des caractères constitutifs (qui ne changent pas avec l'environnement, par exemple, enracinement profond) et dans des conditions artificiellement stables.

Ces caractères peuvent améliorer le rendement dans de larges gammes environnementales, mais ont aussi des conséquences sur la production qui dépendent des conditions environnementales. Par exemple, diminuer fortement la transpiration en ciblant des processus physiologiques constitutifs (p. ex. : le nombre de stomates, les pores permettant le passage de l'eau) peut apporter un nouvel éclairage sur leur fonctionnement, mais l'objectif de maintenir les rendements n'est alors rempli que dans des conditions de sécheresse très sévère, qui ne se produisent que rarement dans un contexte agricole.

De même, un système racinaire plus profond peut être bénéfique en cas de réserves disponibles en profondeur, mais c'est au contraire un système racinaire superficiel qui sera bénéfique dans le cas de sols peu profonds et en cas d'épisodes réguliers de faibles précipitations. Pourtant, la sélection variétale a jusqu'à récemment largement ignoré les processus adaptatifs dynamiques dans des environnements fluctuants, laissant de côté une large gamme de mécanismes temporels d'intérêt pour l'amélioration variétale. Utiliser la modélisation peut permettre d'optimiser ces processus adaptatifs et d'utiliser ces nouveaux leviers pour développer les variétés du futur mieux adaptées à des environnements fluctuant d'une année sur l'autre.

Pour résumer, pour développer les variétés du futur adaptées aux changements climatiques, et plutôt que rechercher un hypothétique gène miracle de la résistance à la sécheresse, une alternative réaliste et efficace est de rechercher dans la diversité génétique un ensemble de caractères physiologiques variétaux, et d'utiliser la modélisation pour prédire leurs avantages respectifs pour chaque scénario local de sécheresse.

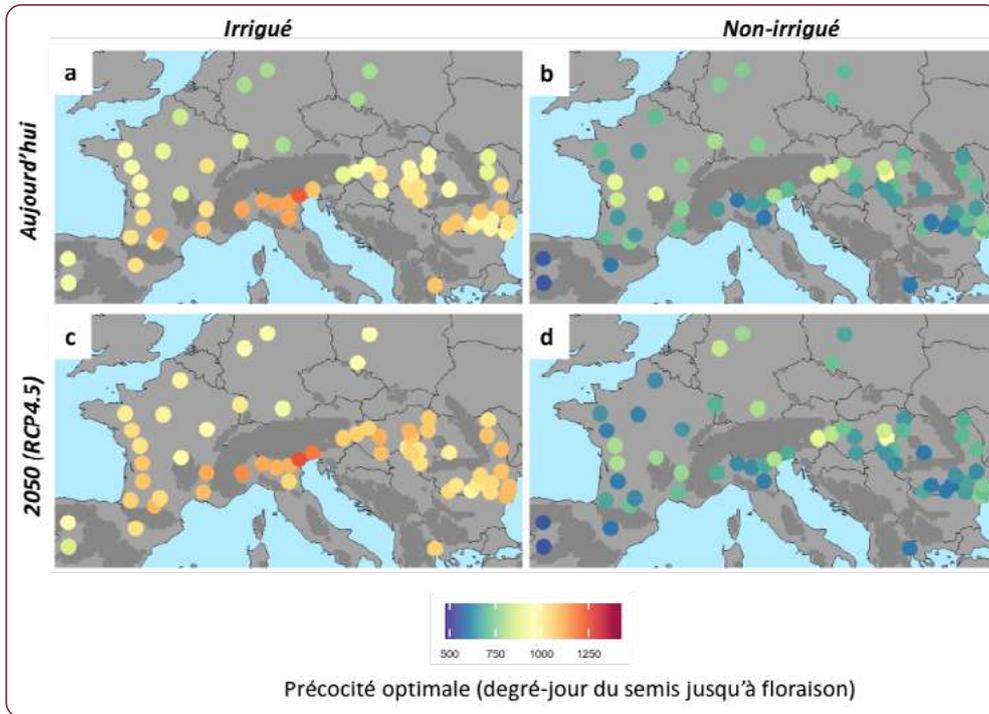


Figure 8.5. Exemple d'utilisation de modèles pour prédire les meilleurs « idéotypes » dans chaque situation locale. Précocité optimale pour une variété de maïs pour une cinquantaine de sites de culture du maïs Européens aujourd'hui et en 2050. (Source : Parent et al., 2018).

	<p><u>HiT-Me</u> Phénotypage des métabolites (<u>Bordeaux</u>)</p> <ul style="list-style-type: none"> -Composition de la Biomasse -Profils de métabolites ciblés ou non ciblés -Métabolisme primaire
	<p><u>PhenoArch.</u> Phénotypage par imagerie en condition contrôllées (<u>Montpellier</u>)</p> <ul style="list-style-type: none"> 2400 plantes Transpiration des plantes Architecture aérienne Croissance Interception du rayonnement
	<p><u>Pheno3C et DiaPHEN.</u> Phénotypage au champ (<u>Montpellier, Clermont-Ferrand</u>)</p> <ul style="list-style-type: none"> CO₂ et contrôle de l'état hydrique Thermographie infrarouge Croissance et architecture Transpiration

Figure 8.6. Exemple de plateformes pour le phénotypage haut-débit de caractères à différentes échelles. (Source : figure composite élaborée par les auteurs)

2.2 Concevoir et évaluer des systèmes de grande culture adaptés au changement climatique

Évaluation des performances de systèmes en agriculture de conservation sur le bassin Adour-Garonne : quelques résultats du programme BAG'AGES (2016-2021)

Lionel ALLETTA (INRAE - AGIR), Julie CONSTANTIN (INRAE - AGIR)

Le projet de recherche BAG'AGES, financé par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne et la Région Occitanie, avait pour objectif de quantifier les performances agronomiques, environnementales et socioéconomiques de systèmes mobilisant différents niveaux de pratiques agroécologiques (diversification des rotations des cultures, utilisation de couverts végétaux, agroforesterie, réduction/suppression du travail du sol), avec un effort particulier d'étude de systèmes en agriculture de conservation dans différents contextes agropédoclimatiques du bassin versant Adour-Garonne. Près de 60 exploitations réparties sur le bassin versant ont été enquêtées pour évaluer leurs performances technico-économiques à l'aide de différents indicateurs.

En parallèle, un réseau de 12 parcelles situées sur des exploitations a été instrumenté et suivi durant 3 années pour évaluer le fonctionnement global du système sol-plante en couplant expérimentation et modélisation. Enfin des travaux de modélisation à l'échelle de petits bassins versants ont visé à quantifier les effets des pratiques agroécologiques sur la dynamique hydrique de ces bassins. Dans cette courte synthèse, seuls les principaux résultats issus des parcelles suivies durant 3 années sont présentés.

Les travaux expérimentaux menés sur des parcelles en agriculture de conservation et, pour certains sites, sur des parcelles mitoyennes cultivées avec labour, font ressortir un fonctionnement hydrique des sols différent de celui observé sur des parcelles travaillées. Les capacités d'infiltration de l'eau sont généralement plus élevées (de 2 à 8 fois) et plus stables dans le temps, à l'échelle d'une saison culturale, que celles mesurées sur parcelles labourées.

Ces différences s'expliquent par une meilleure stabilité structurale du sol en lien avec l'accroissement des teneurs en carbone organique en surface du sol et par une meilleure connectivité du réseau poral sur l'ensemble du profil de sol, qui est ainsi plus performant dans la

conduction de l'eau. Par ailleurs, l'activité de la macrofaune des sols (vers de terre notamment), plus intense en agriculture de conservation, est à l'origine d'un réseau de macropores capables de faire circuler l'eau lors d'épisodes pluvieux intenses, réduisant ainsi les risques de ruissellement de surface ou sub-surface.

Sur certains types de sol (notamment sur sol limoneux de vallée alluviale), une augmentation de la rétention en eau des sols est également observée, en particulier dans les horizons de surface, traduisant notamment une évolution de la mésoporosité, gamme de pores impliqués dans la rétention d'eau disponible pour les plantes. Cet accroissement de rétention en eau des sols peut permettre aux cultures de mieux résister aux périodes de sécheresse et d'améliorer l'efficacité de l'eau en agriculture de conservation mais, à ce jour, cette hypothèse, soutenue par des observations d'agriculteurs, n'a pas pu être testée expérimentalement.

Par ailleurs, l'origine de l'évolution de la gamme de pores impliqués dans la rétention d'eau demeure non explicitée mais pourrait être, au moins partiellement, liée à une augmentation de l'activité méso et microbologique des sols et notamment fongique en agriculture de conservation. Les hyphes des champignons, en se décomposant, contribueraient à fournir un réseau de mésopores bien connectés et ainsi à accroître l'infiltration et la rétention en eau des sols.

Les travaux de caractérisation des populations mycorhiziennes conduits dans le cadre du projet font apparaître des augmentations significatives à la fois de la diversité mais aussi des taux de mycorhization en agriculture de conservation, ce qui va dans le sens d'une probable amélioration de l'alimentation hydrominérale des plantes dans des sols couverts au maximum et sans perturbation mécanique.

Impact du changement climatique sur les interactions plante-virus

Manuella VAN MUNSTER (INRAE - PHIM), Denis VILE (INRAE - LEPSE)

Dans le Bassin Méditerranéen la production agricole et le fonctionnement des écosystèmes sont fréquemment contraints par des épisodes de sécheresse et d'élévation de la température dont la fréquence et la durée augmentent sous l'influence du changement climatique. Ces conditions climatiques ont également une influence sur l'épidémiologie des virus de plantes, cause majeure des maladies affectant les plantes sauvages et cultivées.

Cependant, une infection virale pourrait également, sous certaines conditions, prédisposer les plantes à une meilleure tolérance à des facteurs environnementaux contraignants. L'identification des paramètres qui gouvernent ces interactions complexes aux conséquences néfastes ou au contraire bénéfiques pour la production végétale est une priorité de recherche.

Nos travaux au sein d'INRAE, dans les unités mixtes de recherche LEPSE et PHIM à Montpellier, participent aux dernières avancées en phénotypage des plantes et en virologie pour analyser les effets des facteurs environnementaux abiotiques (sécheresse, température, concentration en CO₂) sur la transmission et la biologie des virus de plantes, et leur impact sur la performance des plantes avec le soutien de la Région Occitanie et de l'Université Montpellier (via [PHENOPSIS 2.0](#) : évolution d'une plateforme de phénotypage plantes à haut-débit en conditions environnementales contrôlées ; le projet [APSEVIR, 2015](#) ou encore l'[Initiative Clé Montpellier Université d'Excellence « Risques et Vecteurs »](#), 2021).

Les virus de plantes confèrent une meilleure tolérance aux stress abiotiques

L'avènement de la métagénomique a permis la détection massive de nombreuses espèces virales dans les plantes sauvages sans être pour autant responsables de maladies. Et même, certains de ces virus peuvent être bénéfiques pour leur hôte en améliorant la tolérance des plantes à des stress abiotiques. A ce jour, les mécanismes qui sous-tendent cette tolérance conférée aux plantes par les virus en conditions extrêmes ne sont pas clairement élucidés.

Deux virus étudiés au laboratoire permettent d'avoir des données génériques sur un virus modèle pour lequel nous disposons de nombreux outils moléculaires (le

virus de la mosaïque du chou-fleur, CaMV) et sur un virus d'intérêt agronomique qui provoque des dégâts majeurs dans de nombreuses plantes cultivées (le virus de la mosaïque du navet, TuMV).

Nous avons montré que des plants de navet (*Brassica rapa*) infectés par le CaMV ou le TuMV étaient plus tolérants à un déficit hydrique sévère que des plants non infectés ([van Munster et al., 2017](#)). Ces observations et les mécanismes impliqués font l'objet d'une collaboration avec une équipe de l'Université Hébraïque de Jérusalem afin de tester une approche innovante, selon laquelle une inoculation virale dirigée pourrait aider les plantes à faire face à des stress abiotiques. Ces recherches ouvrent la voie à l'utilisation potentielle des virus comme « vaccin de tolérance au stress » dans un contexte appliqué.

Impact des stress abiotiques sur la biologie des virus de plantes

Les virus réagissent à des changements de l'environnement de leur plante hôte. Ainsi, une blessure, une augmentation de la salinité du sol, un déficit hydrique, une augmentation de la température ou de la teneur en CO₂ de l'air peut se traduire par une altération de la charge virale, de la virulence et potentiellement de l'efficacité de transmission par un vecteur ([Bergès et al., 2020](#) ; [Yvon et al., 2017](#)). Nous avons mis en évidence ces phénomènes avec notamment une augmentation importante de la transmission par puceron vecteur du CaMV et du TuMV (30 % et 100 %, respectivement) lorsque la plante infectée subissait un déficit hydrique sévère ([van Munster et al., 2017](#)).

Cette altération de la transmission est spécifique du couple plante-virus considéré et d'autres virus voient au contraire leur transmission drastiquement réduite dans de telles conditions environnementales ([Yvon et al., 2017](#)). L'obtention de nouvelles données sur la biologie des virus de plantes (capacité à se multiplier dans l'hôte, virulence, efficacité de transmission) en fonction de l'état physiologique de la plante est essentielle à l'étude des mécanismes impliqués et pour augmenter les capacités de prédiction de l'écologie et de l'épidémiologie des virus, en particulier dans un contexte de changement global.

Vers des systèmes de culture irrigués plus résilients face au changement climatique

Simon GIULIANO (INP PURPAN - AGIR), Valentin DEREMETZ (INP PURPAN), Magali WILLAUME (INP ENSAT - AGIR)

Le projet VACCARM porté par l'UMR AGIR a débuté en 2018 afin de développer des outils permettant de mesurer et de réduire la vulnérabilité des systèmes de culture (SdC) maïsicoles agroécologiques face au changement climatique. Entre l'automne 2018 et le printemps 2020, des ateliers réunissant agriculteurs, techniciens et chercheurs ont permis de co-concevoir des SdC qui répondent aux changements climatiques envisagés en Occitanie.

Pour atteindre à la fois des objectifs économiques, agronomiques, environnementaux (résilience face au changement climatique et qualité de l'eau) et sociaux, ces ateliers ont mobilisé une approche systémique. Ces ateliers ont abouti à la mise en place de SdC expérimentés chez 6 agriculteurs de la région (Tarn, Gers et Haute-Garonne) et sur la station expérimentale de Lamothe où d'autres SdC agroécologiques sont déjà testés depuis 2011 (Ecole d'Ingénieurs de Purpan). Les SdC conçus se situent le long d'un gradient Efficience, Substitution et Reconception (ESR) caractérisant le degré de changement (Hill et MacRae, 1996).

L'ensemble de ces systèmes était comparé à une Monoculture de Maïs conventionnelle, MMConv, une référence locale. Des sondes de suivi de la teneur en eau du sol étaient installées afin d'améliorer le pilotage de l'irrigation. Sur le site de Lamothe, ces mesures étaient complétées par des suivis agronomiques (rendement, adventices) ainsi que par des suivis de la qualité de l'eau, enjeu fort dans le bassin Adour-Garonne. Les données collectées ont permis de comparer les performances des différents SdC (référence et systèmes agroécologiques reconçus) sur de multiples critères (économiques, environnementaux, agronomiques).

Deux des SdC alternatifs mis en œuvre, l'un réduisant l'usage des produits phytosanitaires (MMEcophyto) et l'autre l'intensité du travail du sol (MMStrip-till), ont obtenu des rendements (respectivement 95 ± 18 et 103 ± 18 q/ha) équivalents au SdC de référence (100 ± 14 q/ha)

tout en améliorant la marge semi-nette (respectivement 405 ± 342 et 522 ± 287 €/ha) par rapport au SdC de référence (307 ± 291 €/ha). MMStrip-till et MMEcophyto ont également permis de réduire l'irrigation de 15 % et 19 %, respectivement. De ce fait, ces SdC ont permis d'améliorer la productivité de l'eau de 0,62 et 0,57 q/mm par rapport à MMConv.

Cette productivité de l'eau d'irrigation est un indicateur d'intérêt par rapport à l'adaptation au changement climatique (Bodner et al., 2015). Chez les agriculteurs, les expérimentations doivent continuer afin de confirmer les baisses d'utilisation de l'eau d'irrigation permises par l'utilisation de sondes de teneur en eau du sol. Par ailleurs, sur MMEcophyto, une réduction de 75 % des pertes en produits phytosanitaires dans les eaux de drainage a été observée (Giuliano et al., 2021).

Du point de vue de l'atténuation du changement climatique, la totalité des SdC testés en station a permis de réduire entre 20 % et 40 % les consommations d'énergie par rapport à MMConv (19 514,2 MJ/ha) et par conséquent de diminuer les émissions de gaz à effet de serre afférentes à ces SdC. De plus, la quantité de carbone dans les sols augmente de 0,5 à 5,5 g/kg pour les SdC où le travail du sol a été réduit (voire supprimé) et dans les SdC où des cultures intermédiaires sont systématiquement implantées en hiver. Le SdC en semis direct sous couvert végétal avec apport de compost est celui dont la teneur en matière organique a le plus augmenté. Les cultures intermédiaires nouvellement introduites par les agriculteurs devraient également permettre d'améliorer leur bilan de gaz à effet de serre.

Les résultats obtenus montrent que des compromis peuvent être trouvés au sein des SdC régionaux afin d'atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, tout en améliorant la qualité de l'eau et/ou des sols, mais ceux-ci doivent être adaptés aux contraintes locales (type de sol, régime hydrique de la parcelle, filières présentes, accès à l'eau...).

Impacts du changement climatique sur la culture de soja et possibilités d'adaptation

Philippe DEBAEKE (INRAE – AGIR), Etienne-Pascal JOURNET (INRAE – AGIR), Pierre MAURY (INP ENSAT – AGIR), Céline SCHOVING (INRAE – AGIR, Terres Inovia), Elana DAYOUB (INRAE, INP ENSAT – AGIR), Jay-Ram LAMICHHANE (INRAE – AGIR), Mathieu ABELLA (Terres Inovia), Lionel ALLETTO (INRAE – AGIR), Charlotte CHAMBERT (Terres Inovia), Luc CHAMPOLIVIER (Terres Inovia), Julie CONSTANTIN (INRAE – AGIR), David Camilo CORRALES (INRAE – AGIR), Hélène RAYNAL (INRAE – AGIR)

La culture de soja (*Glycine max* (L.) Merr.), apparue dans le Sud-Ouest de la France dans les années 70 après le premier choc pétrolier, a connu un très fort développement à la fin des années 80 (132 000 ha en 1989). Après des fluctuations de surfaces dues aux soutiens spécifiques apportés, une nouvelle envolée est observée : de 22 000 ha (2008) à 186 000 ha (2020) (dont 35 % en Occitanie). Les débouchés du soja comprennent l'alimentation animale (73 %) et humaine. 29 % des surfaces de soja sont cultivées en AB (l'Occitanie cultivant plus de 50 % du soja bio français).

La recherche d'une autonomie protéique a donné lieu à la création d'une filière tracée et durable, en vue d'un arrêt des importations de tourteaux non OGM d'ici 2025. Cette croissance a été permise également grâce aux atouts agronomiques et environnementaux de la culture (faible consommation en pesticides, faible émission de GES, fixation symbiotique de l'azote...) et à la qualité de sa graine (~41 % de protéines, % MS). Le contexte climatique a permis d'envisager une extension vers les zones septentrionales, soutenue en cela par le développement de variétés plus précoces.



Crédit photo : Terres Inovia.

Au niveau mondial, les impacts négatifs du changement climatique sur le rendement du soja apparaissent moindres que pour les autres cultures (blé, maïs) du fait d'une disponibilité en eau d'irrigation et/ou de sa localisation en climats tropicaux humides (Porter et al., 2014). Cependant, nos travaux ont montré que l'implantation du soja pourrait être affectée par le changement climatique : en particulier, sans avancée de la date de semis, la levée du soja pourrait être exposée à un défaut de pluviométrie (Lamichhane et al., 2020a).

Les travaux communs INRAE-Terres Inovia (UMT Pactole) s'inscrivent dans l'adaptation au changement climatique de la culture de soja. Plusieurs leviers agronomiques ont été évalués :

1) La connaissance de la variabilité génétique du soja

pour la tolérance à la sécheresse. Schoving (2020) a mis en évidence des réponses stomatiques différenciées au sein d'une gamme de variétés ce qui permet d'envisager une adaptation à différents scénarios de sécheresse. Dayoub et al. (2021) ont montré que les traits racinaires (ex angle des racines) et la croissance précoce pouvaient être proposés comme indicateurs de tolérance à la sécheresse en évaluation variétale.

2) Le semis (anticipé d'un mois) pourrait permettre d'esquiver la sécheresse estivale et de réduire les besoins en eau d'irrigation (Lamichhane et al., 2020b). Des rendements un peu inférieurs en moyenne au semis conventionnel, mais une teneur en protéines supérieure ont été observés en expérimentation. Il n'a pas été observé de risque accru de fonte de semis (Lamichhane et Aubertot, 2021).

L'allongement de la saison de culture avec le réchauffement permet d'implanter le soja en double culture (soit en dérobé, soit en relay-cropping) après une céréale. Nos travaux évaluent la faisabilité, les performances (actuelles et futures) et la stabilité de ces nouveaux systèmes en s'appuyant sur des réseaux expérimentaux et de la modélisation. Le modèle de culture STICS a été évalué et amélioré sur le soja (Corrales et al., soumis). Des travaux d'inter-comparaison de modèles (dont STICS) sont réalisés à l'échelle internationale dans le réseau AgMip (Kothari et al., soumis) en vue d'explorer les impacts du changement climatique et de tester des adaptations.

Les travaux d'écophysiologie et d'agronomie sous-jacents mobilisent les plateformes instrumentées de INRAE Auzeville (Agrophén, Héliaphén, serres, phytotrons) et de Terres Inovia (En Crambade), avec l'appui de partenaires privés (Euralis, RAGT, Caussade). Ceci a permis de développer un algorithme phénologique simple (SPA) pour la prévision des stades et le positionnement des cycles de culture (Schoving et al., 2020). Des travaux sont menés en collaboration avec d'autres équipes européennes au nord (ZALF, Berlin) et au sud (IRTA, Lleida) dans le cadre du projet « LegumeGap » en vue d'étudier la localisation actuelle et future du soja en culture principale et en dérobé (Nendel et al., 2020).

Bien que le soja valorise très bien l'eau d'irrigation (8-10 q/ha pour 100 mm apportés) et nécessite 30 à 50 mm de moins que le maïs (Champolivier, 2006), son développement dans le contexte du changement climatique dépendra de la ressource en eau disponible dans le futur car la plante reste assez sensible à la sécheresse.

Identification et évaluation des stratégies d'adaptations possibles au changement climatique pour le blé, les pommes de terre et le tournesol et impacts sur leur santé

Marie Hélène ROBIN (INP PURPAN – AGIR)

Ont contribué par leur travaux sur le projet OPERATE : Marie-Odile BANCAL, Jean-Noël AUBERTOT, Philippe DEBAEKE, Violaine DEYTIEUX, Marie LAUNAY et Laurent HUBER.

Dans un contexte de changement climatique et de pré-occupation croissante pour la sécurité alimentaire, la compréhension et la prévision des effets du climat sur les maladies des cultures deviennent des enjeux incontournables (GIEC, 2014). C'est une préoccupation agromajore, de nature à faciliter l'adaptation de nouvelles pratiques agricoles face aux aléas climatiques actuels et futurs. Le projet de recherche OPERATE « crOP disEase Response to climATE change adaptation », porté par l'INRAE, vise à quantifier les impacts sur la santé des plantes des adaptations aux stress abiotiques majeurs futurs liés au changement climatique dans le cas de 3 grandes cultures (maïs, blé et tournesol).

Au niveau régional d'Occitanie, le projet d'étudiants (École d'Ingénieurs Purpan), a permis dans un premier temps de proposer une analyse des trois filières de production de grandes cultures : céréales/pomme de terre/tournesol de l'amont à l'aval afin : 1) d'identifier puis sélectionner les voies d'adaptations régionales préférentielles par filière, 2) d'évaluer les besoins et attentes des porteurs d'enjeux pour chacune des filières et 3) d'identifier à dire d'experts les impacts potentiels de ces adaptations sur la santé des plantes et les critères permettant d'évaluer les adaptations. Il s'est avéré que les différents acteurs se sentent en grande majorité très préoccupés par le changement climatique en relation avec des baisses de rendement et de plus grandes difficultés d'accès à l'eau.

L'augmentation de la sévérité des bioagresseurs a été soulignée par tous surtout pour le risque lié aux ravageurs. Pour limiter les effets du changement climatique sur les cultures, les leviers envisagés sont essentiellement du ressort de l'agroécologie comme le levier génétique, la gestion des couverts végétaux ou la diversification des systèmes. De manière intéressante, l'échantillon était à 80 % constitué d'agriculteurs bio plus réceptifs que les agriculteurs conventionnels au questionnement des étudiants.

Le même travail a été réalisé par des étudiants d'Agro-ParisTech. Les principales adaptations retenues sont les stratégies de compensation de la ressource en eau telles que l'irrigation, et l'amélioration génétique de la tolérance de la plante aux stress thermiques et hydriques ; des stratégies d'évitement, telles que la modification des dates de semis et de la précocité des variétés, allant jusqu'à la relocalisation de cultures ; et des stratégies de re-conception de filières en proposant l'introduction d'espèces apparentées comme le seigle dans le cas du blé ou de l'agroforesterie.

La deuxième étape a consisté à simuler les adaptations aux stress abiotiques et leurs impacts sur la production, l'environnement et la santé des plantes. Concernant la culture du tournesol, espèce a priori rustique, des simulations ont été réalisées avec le modèle biophysique SUNFLO sur les performances attendues des adaptations agronomiques au changement climatique qui pourrait consister en une opportunité de l'implanter dans de nouvelles aires de culture plus septentrionales et de diversifier ainsi les rotations.

Concernant la culture de la pomme de terre, le modèle MILEOS® a été utilisé pour anticiper l'évolution du risque de mildiou avec ou sans adaptation des pratiques. On observe une modification des profils épidémiques avec un accroissement des risques au printemps sans incidence majeure sur les cumuls de risques annuels. L'avancement des dates de plantation et le développement de variétés plus résistantes au mildiou et tolérantes à la sécheresse semblent être des voies d'adaptation pertinentes pour la gestion du risque sanitaire.

Concernant le blé, l'évolution du risque sanitaire a été estimé sur rouilles, septoriose, fusariose, piétin verse ; si en l'absence d'adaptation, le risque biotique semble diminuer dans le futur pour la septoriose et la fusariose, se posent alors des questions comme le compromis à trouver face à des irrigations nécessaires pendant la montagne pour le maintien du rendement. La combinaison de plusieurs leviers permettra d'identifier les meilleurs compromis mais également l'évolution possible des risques multiagresseurs.

La dernière étape consiste à identifier les stratégies d'adaptations les plus prometteuses par analyse multicritères. Pour cela, une méthode d'évaluation multicritères, basée sur un modèle de décision multi-attributs qualitatif a été développée et déclinée pour chaque culture. Trois grandes catégories de critères d'évaluation sont considérées : la quantité et la qualité des productions, la maîtrise des impacts environnementaux, la maîtrise des risques sanitaires.

Les différents critères d'évaluation sont renseignés principalement à partir des sorties des modèles de culture ou des modèles épidémiologiques, et sont complétés par le calcul de quelques indicateurs économiques (marge semi-nette) ou environnementaux (consommation d'énergie) (figure 8.7).

Les résultats d'évaluation multicritères seront présentés aux acteurs du projet et des filières régionales pour identifier les stratégies d'adaptations les plus prometteuses, des voies d'améliorations de certaines d'entre elles et discuter de la faisabilité de leur mise en œuvre. Au niveau de l'Occitanie, le projet a donc permis d'identifier

par enquêtes et expertises les voies d'adaptations préférentielles et les besoins et attentes par filière, d'évaluer à quels horizons temporels ces acteurs se projettent pour les différentes problématiques, et enfin, d'identifier par modélisation les impacts potentiels de ces adaptations sur la santé des plantes.

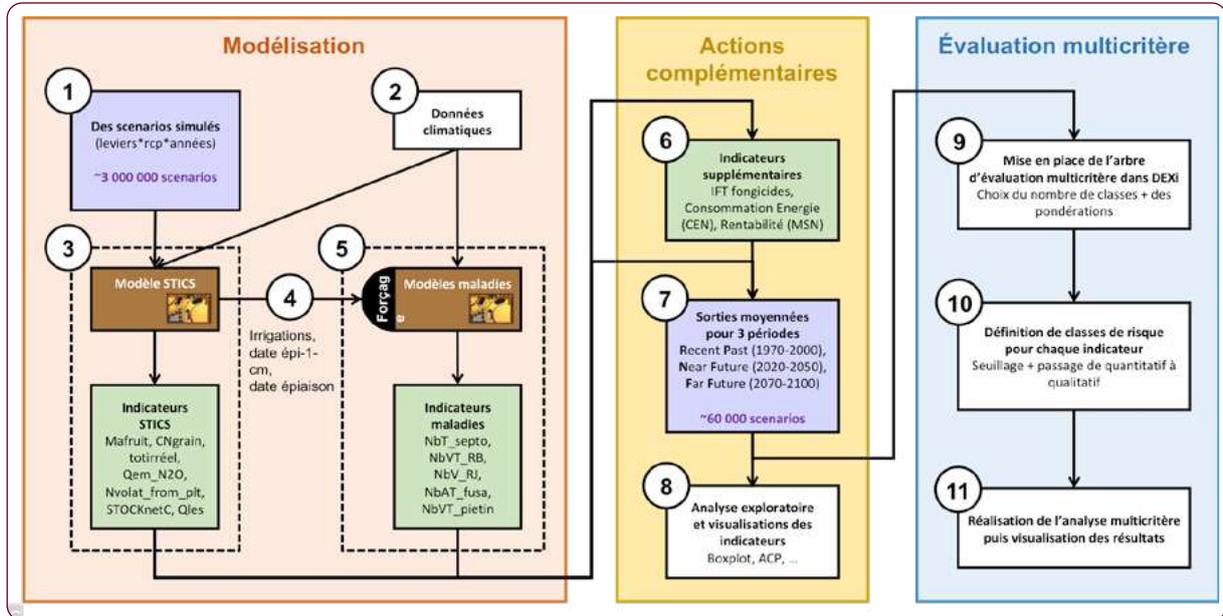


Figure 8.7. Identifier les stratégies d'adaptations les plus prometteuses par analyse multicritères. (Source : projet Operate)



3. VITICULTURE

3.1 Adaptation au changement climatique pour la vigne et le vin : une approche interdisciplinaire et participative

Jean-Marc TOUZARD (INRAE - Innovation), Nathalie OLLAT (INRAE - EGFV)

Avec près de 250 000 ha de vigne, 2 milliards de chiffre d'affaires et 20 000 producteurs dont 2500 qui vinifient directement leur raisin, la viticulture conserve en 2021 une place économique et sociale importante en Occitanie. Mais cette activité est très marquée par le changement climatique, dont elle est un témoin précurseur, poussant ses acteurs à expérimenter de nombreuses solutions pour s'adapter. Le projet LACCAVE (Ollat et Touzard, 2014) étudie depuis 2012 les options d'adaptation pour les vignobles français, et en particulier dans la région Occitanie. Il rassemble une centaine de chercheurs et d'étudiants de différentes disciplines (climatologie, génétique, agronomie, œnologie, géographie, économie...) et s'est appuyé progressivement sur des méthodes participatives.

Des impacts qui menacent la pérennité du vignoble languedocien

Les impacts du changement climatique sur les vignobles d'Occitanie sont multiples, s'accroissent et peuvent se combiner différemment selon les années (Ollat et al., 2016) :

- les stades de développement de la vigne sont plus précoces, depuis le débourrement (induisant une vulnérabilité plus forte aux gels tardifs), jusqu'à la maturité des raisins et donc leur récolte (démarrage dernières semaines d'août contre mi-septembre avant les années 80). Cette précocité amplifie l'augmentation de température lors des vendanges, avec des risques accrus d'altération des goûts ;
- le bilan hydrique diminue sur la période végétative des vignes (évapotranspiration plus forte, pluviométrie plus faible). Il est ainsi négatif depuis 2000 sur la plaine littorale avec des conséquences sur les rendements ou la composition des baies (Ojeda et Saurin, 2014) ;
- les caractéristiques des raisins et vins se modifient. Le taux d'alcool augmente (de 11° à 14° en moyenne depuis les années 80), l'acidité baisse, les profils aromatiques évoluent, des pertes de couleur (anthocyanes) sont repérées sur les vins rouges ;
- l'intensité accrue d'événements extrêmes accentue les risques de perte de récolte, voire de destruction de vignes (notamment jeunes plants, plus sensibles). Cela a été le cas lors de la vague de chaleur de 2019 (Pret et al., 2021), de la gelée du 8 avril 2021 ou de pluies torrentielles ;

- d'autres effets sont aussi mentionnés : bioagresseurs (mildiou) favorisés les années chaudes et humides, salinisation de sols viticoles en bordure du littoral, et surtout risques accrus d'incendies et modification de paysages pouvant affecter l'écosystème cultivé et les images associées à la qualité du vin.

Ces effets accentuent les contraintes pour produire du raisin et du vin en zone méditerranéenne avec des conséquences économiques globalement négatives pour les entreprises : baisses de production, modifications de qualité du vin en déphasage avec la demande, risques économiques accrus.

Des leviers d'adaptation testés chez les viticulteurs ou par la recherche

Pour autant des solutions techniques ou organisationnelles sont possibles, expérimentées et mises en œuvre pour faire face à ces impacts :

- renouveler et diversifier l'encépagement avec des variétés plus tardives, résistantes à des températures plus élevées et à la sécheresse, produisant moins de sucre et plus d'acidité, et si possibles résistantes aux maladies... Les options, engagées et objet d'évaluations, concernent des variétés anciennes, des cépages d'autres régions méditerranéennes ou des créations variétales (Wolkovich et al., 2018) ;
- modifier les pratiques culturales, à la fois au niveau de la gestion du sol (amendement de matière organique pour renforcer la réserve utile en eau, travail du sol favorisant la pénétration de l'eau, couvert limitant l'évaporation...), de la gestion de la canopée (hauteur, forme et volume du feuillage favorisant l'ombrage et limitant le besoin en eau, taille plus tardive...), ou d'une modification plus radicale de l'agrosystème (plantation raisonnée d'arbres pouvant tamponner le climat) ;
- développer l'irrigation de précision pour piloter l'état hydrique de la vigne. L'option mise en avant par les organisations viticoles ne peut toutefois concerner qu'un nombre limité d'hectares en Occitanie, et suppose des pratiques économes en eau, prenant en compte la durabilité de la ressource (Graveline et Grémont, 2021) ;
- adopter de nouvelles techniques œnologiques pour corriger après récolte certains effets du changement climatique sur la composition des raisins.

Cela concerne la désalcoolisation (techniques par membrane), l'ajustement du Ph (électrodialyse...), le choix de levures à plus faible rendement en éthanol ou un meilleur contrôle de la température ;

- relocaliser les vignes sur des parcelles moins exposées au soleil, avec des sols plus profonds, ou plus en altitude pour gagner en fraîcheur. Ces stratégies sont observables par exemple sur les terrasses du Larzac ou à Banyuls (Delay et al., 2015). L'adaptation des vignobles dans l'espace concerne aussi les choix de densité de plantation, la gestion des terrasses, du bassin versant ou du paysage ;
- développer de nouveaux services d'assurance, mais aussi renforcer les systèmes d'information et d'alerte climatique, favoriser le conseil et la prévention (règles de décision, équipements) pour réduire les risques ;
- faire évoluer les cahiers des charges des appellations (introduction de nouveaux cépages et pratiques) et, plus largement, les organisations et poli-

tiques viticoles pour favoriser innovations et partages d'expérience (Boyer et Touzard, 2021).

Co-construire des stratégies d'adaptation à plusieurs échelles

Au-delà d'une analyse de ces différents leviers d'adaptation, les travaux du projet LACCAVE ont rapidement montré que l'enjeu était de concevoir et d'étudier leurs combinaisons possibles dans des stratégies d'adaptation pouvant se construire à différentes échelles d'action.

Les chercheurs se sont pour cela engagés dans des travaux systémiques, mobilisant des démarches participatives et ouvertes, impliquant une diversité d'acteurs concernés par l'évolution des vignobles d'Occitanie.

Ces démarches se sont déployées à des échelles locales pour explorer de nouveaux systèmes viticoles (voir texte 3.2) ou faire émerger des solutions partagées (voir texte 3.3), et des stratégies pour la filière aux échelles régionales et nationales (voir texte 3.4).

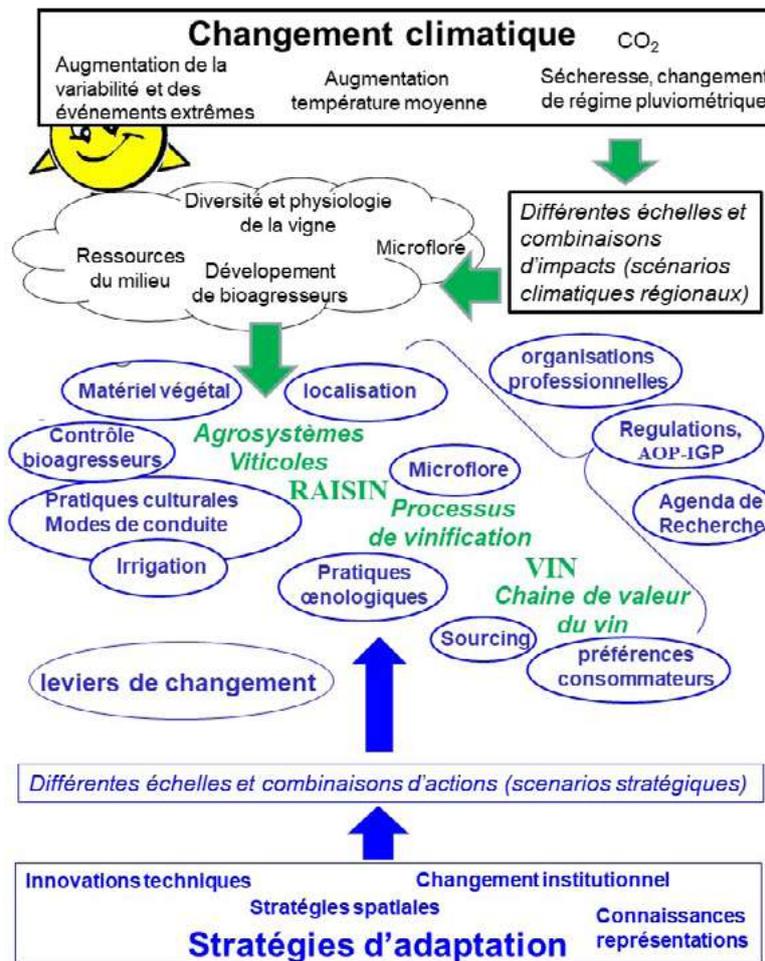


Figure 8.8. Schéma impacts et adaptation pour la vigne et le vin. (Source : N. Ollat et J.-M. Touzard, 2014)

3.2 Vignobles méditerranéens : de l'évaluation locale du changement climatique à l'identification de leviers d'adaptation

Audrey NAULLEAU (INRAE - ABSys), Laure HOSSARD (INRAE - Innovation), Christian GARY (INRAE - ABSys), Laurent PRÉVOT (INRAE - LISAH)

La caractérisation des impacts du changement climatique sur le cycle de la vigne, la quantité et la qualité des rendements viticoles fournit des informations importantes pour anticiper ce changement (Ollat et Touzard, 2014). De nombreux leviers d'adaptations sont proposés et sont inclus pour certains dans les politiques publiques : en 2018, le département de l'Hérault vote un schéma d'irrigation ; en 2019 l'AOP Languedoc inscrit à son cahier des charges des cépages expérimentaux tolérants à la chaleur et à la sécheresse ; en 2021 l'Etat lance le programme « Plantons des haies », etc.

La difficulté actuelle consiste à évaluer les effets d'une articulation spatiale de ces leviers en intégrant la diversité des contextes pédoclimatiques et socio-économiques à une échelle locale (types de sols, types de production, accès à l'irrigation, etc.).

Notre démarche est de mettre au service des acteurs d'un petit territoire viticole, des outils de modélisation disponibles au sein de la recherche, afin de simuler l'impact du changement climatique dans un contexte donné, ainsi que l'effet de différentes stratégies d'adaptation.

Pour réaliser notre étude, nous avons choisi le bassin versant du Rieutort (1500 ha de vignes, **figure 8.9**) situé au nord de Béziers. Nous y mobilisons des acteurs d'horizons divers : syndicats d'AOP, représentants de la cave coopérative, syndicat mixte d'animation du bassin, conseillers de la Chambre d'Agriculture, et viticulteurs.

En parallèle nous mobilisons un certain nombre d'experts de cette question (Chambre d'Agriculture de l'Hérault, Institut Français de la Vigne et du vin, AOP Languedoc, Conseil départemental, INRAE).

Après avoir décrit les contextes pédoclimatiques et les pratiques viticoles associées au sein du territoire étudié, nous utilisons les projections climatiques fournies par Météo-France pour simuler l'impact de ces futures conditions climatiques sur la phénologie, la contrainte hydrique et le rendement de la vigne, selon deux scénarios climatiques (+2 °C, +5 °C), aux horizons 2050 et 2100 (GIEC, 2014).

Les résultats montrent que le cycle de la vigne est avancé de 10 jours à l'horizon 2050 jusqu'à 23 jours à l'horizon 2100 avec une avancée plus marquée sur les reliefs au nord du bassin versant, du fait d'un encépagement plus tardif et d'une augmentation plus importante des températures. Ce décalage amène le raisin à mûrir dans des conditions chaudes très différentes des conditions actuelles. Les rendements des zones en IGP subissent une baisse plus importante que les rendements en AOP, d'une part du fait d'un potentiel de rendement actuellement élevé et d'une pluviométrie annuelle inférieure à 550 mm.

Enfin, les parcelles actuellement irriguées (10 % des surfaces) voient leurs besoins en eau d'irrigation multipliés par 1,7 en 2050 et jusqu'à 2,2 en 2100 pour maintenir des rendements de 90 hl/ha en IGP. A l'échelle du bassin versant, nous estimons une perte de production de l'ordre de 10 % à l'horizon 2050 et de 14 % à l'horizon 2100. Une première stratégie visant à augmenter les surfaces irriguées jusqu'à 30 % du bassin viticole n'entraîne qu'une réduction de 2 % de la baisse de production attendue à l'échelle de ce bassin.

Les modèles utilisés dans cette étude ne permettent pas de prendre en compte l'intégralité des processus et des leviers pour l'adaptation au changement climatique (effets microclimatiques, tolérance des cépages à la sécheresse, qualité des sols, etc.). Cependant, la confrontation de ces résultats avec les acteurs a permis d'identifier, localement, quelques leviers d'adaptation :

- 1) L'augmentation de l'efficacité de l'eau dans les zones irriguées (adéquation besoin/apport, limitation de la vigueur de la vigne, enherbement) ;
- 2) Le maintien d'un haut niveau de valorisation économique dans les zones AOP pour assurer la pérennité malgré un maintien de faibles rendements ;
- 3) L'importance de mobiliser des leviers à la plantation des vignes pour veiller à l'adéquation matériel végétal/parcelle, un enracinement profond (technique de greffe, enherbement, limitation du tassement), et favoriser un microclimat moins chaud (orientation des rangs, ombrage, haies).



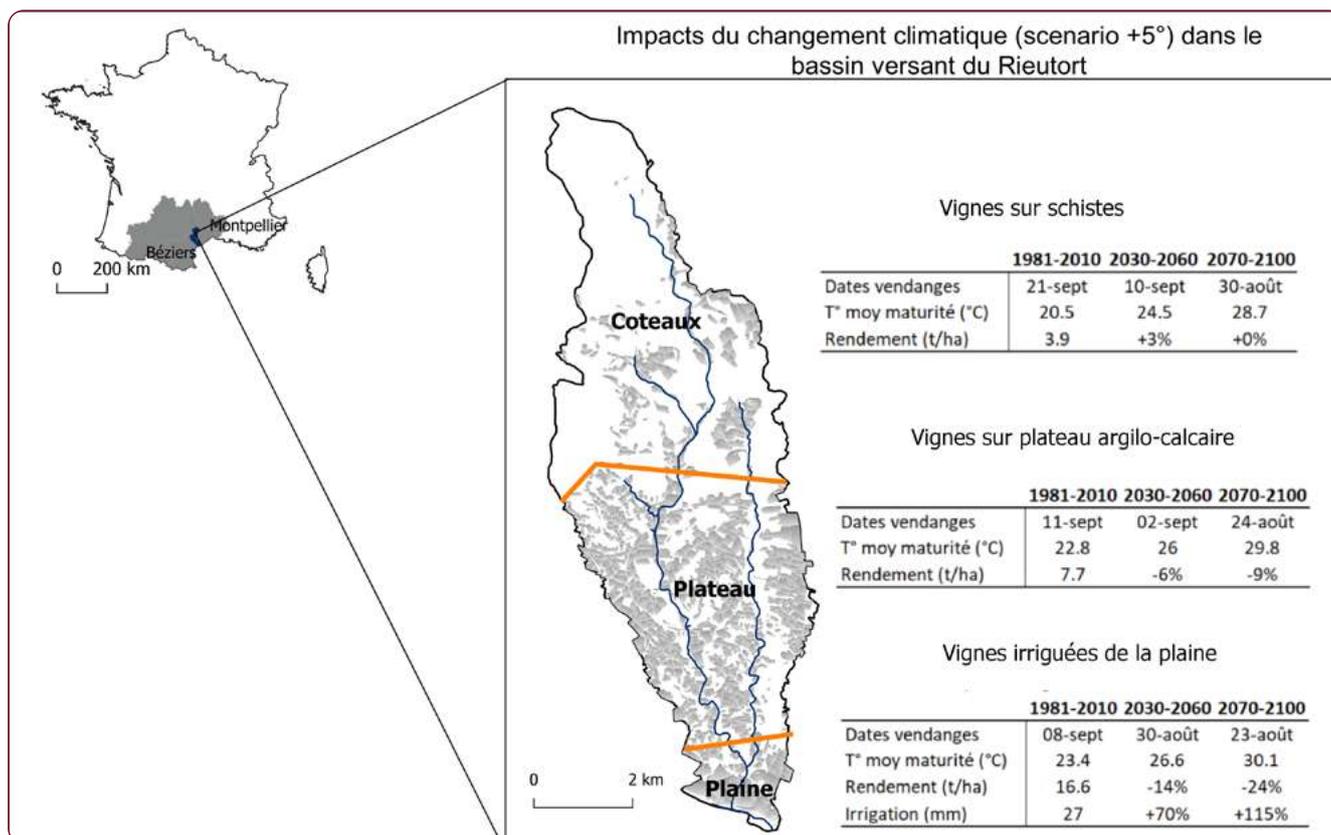


Figure 8.9. Impacts du changement climatique (scénario +5 °C) sur le vignoble du bassin versant du Rieutort (en gris). Les dates de vendanges, les températures moyennes pendant la maturation des baies, les rendements potentiels et les besoins en irrigation sont calculés sur des périodes de 30 ans. (Source : A. Naulleau, 2021 - carte élaborée pour le CROCC_2021)

Encadré 8.A. VINEAS, la plateforme collaborative pour la vigne, le vin et le changement climatique

[VINEAS.net](https://vineas.net) est une plateforme collaborative qui rassemble acteurs et projets et permet de partager des connaissances et des solutions. Elle a pour objectif de faciliter la production et le partage des connaissances nécessaires pour faire face au changement climatique avec six catégories de données :

- Identifier les **acteurs** engagés sur ces enjeux et mettre en valeur vos **projets** ;
- Être visible en tant que **membre actif** de la plateforme ;
- Naviguer et contribuer à la diversité des **solutions et leviers** face au changement climatique ;
- Explorer tous les **documents** (de la littérature scientifique aux vidéos / rediffusions d'événements) qui fournissent une base de connaissances importante allant de l'expertise locale à la recherche ;
- Informer et s'informer des dernières **actualités** sur le sujet ;
- Donner de la visibilité et être sûr d'être informé de tous les **événements** organisés autour de ces défis ;
- Poster vos questions, idées, demandes d'échange d'expériences, etc. dans une **agora** où les autres utilisateurs pourront vous répondre.

Pour en savoir plus : [vidéo](#) de présentation.



VINEAS est développée dans le cadre du **projet MEDCLIV**, MEDiterranean Climate Vine & Wine Ecosystem. Ce projet vise à développer un écosystème d'innovation permettant d'**expérimenter des approches participatives** pour aider à la conception et aux partages de stratégies d'adaptation pour la **filière vigne et vin Méditerranéenne** face au **changement climatique** et inciter à l'action collective. Cet écosystème repose sur l'organisation d'événements participatifs et une plateforme Internet.

Durée : **trois ans** à partir d'octobre 2019.

Six pays impliqués : Italie, France, Portugal, Chypre, Slovénie, Espagne.

Financement par la **Climate-KIC** : association dépendant de la Commission Européenne qui vise à financer et accompagner des projets sur le changement climatique.

3.3 La contribution des démarches participatives

Nina GRAVELINE (INRAE - Innovation), Jean-Marc TOUZARD (INRAE - Innovation)

Les leviers pour l'adaptation au changement climatique de la viticulture et ses filières peuvent être initiés puis portés par des acteurs à des échelles d'action différentes, depuis les choix techniques du viticulteur sur sa parcelle, jusqu'à l'évolution de la réglementation au niveau national ou aux stratégies marketing des distributeurs du vin (Ollat et al., 2015). Mais l'échelle du territoire, en particulier local ou régional, ressort comme particulièrement stratégique, appelant au développement de nouvelles démarches participatives.

Construire de nouvelles stratégies territoriales pour la viticulture

Plante pérenne dont la qualité des fruits (puis du vin) est très sensible à des conditions locales, la vigne s'est historiquement ancrée dans des territoires où se sont construits des savoirs et pratiques adaptés à chaque situation. Ces « terroirs » sont devenus des marqueurs de la qualité du vin, reconnus par les consommateurs et institutionnalisés pour la régulation économique du secteur (Appellations d'Origine Contrôlée, interprofessions régionales...).

Le changement climatique vient bouleverser cet ancrage territorial de la viticulture et des vins : ses impacts, différenciés selon les régions, modifient les rendements et les qualités des vins, remettent en cause la hiérarchie entre appellations, et affectent les paysages qui comptent aussi pour l'image des vins. Les réponses adaptatives des viticulteurs changent aussi les « liens au terroir » par l'introduction de nouveaux cépages et pratiques, ou la relocalisation de vignes parfois en dehors des aires d'appellation.

Aux échelles locale et régionale, de nouvelles actions collectives sont donc mises en œuvre pour accompagner l'adaptation au changement climatique, à partir d'organisations viticoles existantes (en particulier les organismes de gestion des appellations), mais aussi d'initiatives multi-acteurs plus originales. Ces initiatives répondent à un besoin accru de partage de connaissances, de coordination entre nouvelles actions individuelles et de négociations accrues avec d'autres acteurs impliqués dans la gestion de ressources stratégiques pour la viticulture (sols, eau, paysages...) (Delay et al., 2015).

L'enjeu est de construire de nouvelles relations entre la viticulture, ses vins et ses territoires, en développant des méthodes prenant en compte la diversité des leviers d'adaptation et en s'ouvrant à de nouveaux acteurs.

Intérêt et pluralité des démarches participatives pour l'adaptation

Dans ce contexte, les démarches participatives offrent plusieurs intérêts, en permettant de répondre à des objectifs tels que :

- accéder à des données plus nombreuses, dans des domaines multiples liés au changement climatique ;
- mieux prendre en compte des conditions locales d'adoption d'innovation pour l'adaptation ;
- construire une vision commune et favoriser la prise de conscience ;
- élargir les connaissances pour construire des stratégies plus complexes et explorer des options plus radicales ;
- construire des liens, favoriser la cohésion et la légitimité d'agir, enrôler des acteurs liés à l'usage de ressources territoriales ;
- imaginer des projets concrets et les initier dans le territoire ;
- évaluer des mesures ou stratégies.

Les démarches participatives engagées dans les vignobles d'Occitanie prennent des formes diverses, selon leurs initiateurs (organisation viticole, collectivité, recherche...), le niveau d'ouverture hors du monde viticole, le degré de participation (consultation, concertation, co-décision) ou les dispositifs et méthodes utilisés (ateliers, focus group, forum, open lab...).

Les chercheurs du projet LACCAGE et leurs partenaires se sont ainsi engagés dans les démarches participatives suivantes :

- des réseaux d'observation sur le vignoble (cépage, pratiques, climat, états du vignoble...) associés à des démarches de « sciences participatives » ou d'expérimentation ;
- des ateliers participatifs ciblés sur les viticulteurs pour identifier et évaluer des mesures d'adaptation à l'échelle d'une coopérative, d'une appellation ou d'un projet de recherche (cf **texte 3.2**) ;
- des living labs visant à suivre à plus long terme la mise au point d'innovations, à l'image du projet OCCITANUM testant des solutions numériques pour l'adaptation ;
- des démarches de concertation organisées par une collectivité territoriale pour l'élaboration de son plan climat territorial (PCAET) ;
- des forums territoriaux à l'échelle d'un bassin viticole ou de la région (cf **texte 3.4**) pour que les viticulteurs, l'état, les collectivités, et la recherche puissent coordonner leurs actions d'adaptation et d'atténuation ;
- des événements créatifs locaux visant à favoriser l'émergence et la mise en œuvre de solutions, à l'image des Climathons (cf infra).

L'exemple des « Climathons » dans des communes viticoles

Une initiative originale testée par INRAE en Occitanie est l'organisation de Climathons dans les territoires viticoles. Le Climathon est un ideathon formalisé et promu par la [Climate KIC](#) ; initialement pensé pour les villes, nous les avons adaptés à des territoires ruraux et viticoles. Cet événement vise à rassembler pendant 24 h un public très large (viticulteurs, chercheurs, étudiants, élus, représentants d'associations, habitants...) pour imaginer et faire émerger des projets pour l'adaptation au changement climatique à l'échelle d'une commune.

Les Climathons organisés à [Murviel-les-Montpellier](#) et à [Montpeyroux](#) dans l'Hérault ont suivi une même démarche en 6 étapes, ponctuée de temps de convivialité :

- présentation et partage des enjeux locaux du changement climatique ;
- large exploration de solutions (animation de type World Café) ;
- construction d'un « cep des solutions » pour organiser les solutions, puis faire voter celles qui seront développées par des groupes ;
- première ébauche des projets par groupe, présentés en « pitch » de quelques minutes ;
- visite chez des viticulteurs pour mettre à l'épreuve la première mouture de chaque projet ;
- développement de chaque projet, présentation finale, vote et remise des prix...

A Murviel comme à Montpeyroux certains projets issus du Climathon paraissent assez classiques, comme le développement de « systèmes d'irrigation responsable » ou de « parcelles expérimentales sur les cépages et

pratiques », mais ils sont conçus, puis portés par une diversité d'acteurs locaux. D'autres projets sont plus originaux et impulsés par des acteurs non viticoles comme une « certification climatique locale », la création d'une « Agora des savoirs », la « diversification culturelle » ou l'installation d'une « écurie vigneronne ».

Les impacts des Climathons sont notables : au-delà de nouvelles idées partagées et de retours médiatiques, on peut noter par exemple à Murviel la constitution d'un GIEE « vigne, sol et climat », le lancement de projets concrets (introduction de l'élevage, Agora, parcelle expérimentale...), mais aussi la diffusion de la démarche vers d'autres territoires viticoles (Cabrière en octobre 2021) ou dans des événements plus importants (Salon SITEVI 2021 sur la gestion des risques climatiques).

Parmi les enseignements on peut retenir que réunir les acteurs d'un territoire autour d'enjeux communs a beaucoup de valeur en soi, amenant à considérer l'enjeu climatique dans ses relations avec les autres enjeux (transition agro-écologique, économiques, sociaux) auquel fait face la filière et ses territoires. Le choix des participants, la clarté de la communication, un langage commun, le choix des outils d'animation, le temps et les compétences investis sont des facteurs de réussite de ces démarches participatives.

Par ailleurs, les travaux participatifs visant l'évaluation semblent plus pertinents pour traiter certaines adaptations pour des raisons d'échelle spatiale et de positionnement stratégique des acteurs. La complémentarité doit donc être recherchée entre plusieurs démarches, et avec des plateformes collaboratives comme www.vineas.net qui couvre l'échelle Méditerranéenne, particulièrement pertinente pour le vignoble Languedocien.



Figure 8.10. Les six équipes dans l'élaboration des solutions lors du Climathon de Murviel-lès-Montpellier. (Source : J.-M. Touzard, 2018)

3.4. Une démarche de prospective pour construire des stratégies d'adaptation à l'échelle régionale et nationale

Hervé HANNIN (AGRO - MOISA), Jean-Marc TOUZARD (INRAE - Innovation)

Dans le cadre du projet LACCAVE, un exercice de prospective a été réalisé en 2014 et 2015 pour identifier des scénarios d'adaptation de la viticulture française à l'horizon 2050, développer une vision commune et de nouvelles collaborations entre chercheurs et professionnels. De manière originale, l'exercice a été utilisé entre 2016 et 2018 pour animer des forums participatifs dans sept régions viticoles, dont l'Occitanie, et formuler des propositions d'action. Celles-ci ont ensuite été reprises pour élaborer la stratégie nationale d'adaptation du secteur, présentée au Ministre en 2021.

Un premier exercice de prospective pour la viticulture française en 2050

Dans le cadre du projet LACCAVE, le groupe à l'origine de la démarche, constitué de chercheurs et d'experts associés, a d'abord élaboré quatre scénarios d'adaptation, en prenant comme hypothèse de travail un scénario climatique médian du GIEC, et en combinant deux dimensions de l'adaptation : les choix de localisation des vignes et l'ampleur de l'innovation technologique. Ces scénarios ont été précisés et décrits sous forme de résumés publiés et médiatisés dans le contexte de la COP21 (Aigrain et al., 2016). Ont été ainsi distinguées : 1) une stratégie « conservatrice » où les changements technologiques et géographiques sont limités ; 2) une stratégie « nomade » où le déplacement des vignes est le principal vecteur d'adaptation ; 3) une stratégie « innovante » où l'intégration des innovations permet le maintien des vignobles dans leurs localisations actuelles ; et 4) une stratégie « libérale » largement ouverte à toutes sortes de changements.

Un forum régional sur la viticulture d'Occitanie dans le contexte du changement climatique

Le groupe « prospective » de LACCAVE a ensuite organisé des forums dans les principaux vignobles français pour échanger sur « l'avenir de la viticulture dans le contexte du changement climatique », en partant de la prospective initiale. Il a réalisé l'un de ces forums le 22 novembre 2017, au Mas de Saporta près de Montpellier, avec l'appui des organisations viticoles régionales. La journée a réuni 105 participants (viticulteurs, négociants, ingénieurs ou techniciens R&D, scientifiques...), répartis en douze groupes de travail munis de tablettes numériques. La journée s'est organisée en cinq séquences :

- un temps de partage de connaissances sur les impacts et adaptations possibles ;
- une présentation des 4 scénarios élaborés par le projet LACCAVE ;
- un travail par table pour préciser enjeux et conséquences de chaque scénario en Occitanie ;

- un vote individuel exprimant l'attitude stratégique au regard de chaque scénario ;
- le recueil de propositions d'actions pour favoriser ou défavoriser chaque scénario.

Les participants ont globalement perçu le changement climatique comme une menace immédiate, et mis l'accent sur des stratégies qui s'appuient sur l'irrigation, le renouvellement du matériel végétal et des pratiques culturales, avec des options différentes selon chaque scénario, mais le repérage de difficultés économiques en raison soit de pertes de compétitivité (scénario conservateur), soit d'une augmentation des coûts de production (scénario innovant). Les attitudes stratégiques sont apparues convergentes : 82 % des participants ont exprimé une volonté de favoriser le scénario innovant et 24 % le conservateur ; 40 % ont considéré qu'il faut se préparer au scénario nomade et 50 % qu'il faut agir dès aujourd'hui pour éviter le chemin libéral. Au final, 327 propositions ont été recueillies, avant tout pour favoriser le scénario innovant, avec la volonté d'améliorer deux voies : d'une part autour des IGP et de l'irrigation, d'autre part autour de l'agroécologie associée à de nouvelles technologies sur les coteaux en sec (Hannin et al., 2020). Les résultats ont été repris par les organisations régionales pour définir leur stratégie, en particulier l'appellation Languedoc, l'IGP Oc et la Chambre régionale d'agriculture.

Une démarche répliquée dans d'autres régions et débouchant sur une stratégie nationale d'adaptation

Cette démarche a été dupliquée dans les 7 grands vignobles français, donnant lieu à des séminaires structurés et animés à l'identique entre novembre 2016 et février 2018. Les votes et les propositions d'action recueillies ont été analysés et comparés. Des différences ont été enregistrées entre les vignobles régionaux, quant à l'impact du changement climatique et aux mesures préconisées, mais une convergence se fait jour pour favoriser le scénario « innovant » afin de conserver globalement la localisation géographique des vignobles actuels grâce à l'introduction de nouveaux progrès techniques (Touzard et al., 2020).

Rapidement, cette démarche multi-régionale s'est doublée d'un accompagnement par le projet LACCAVE des organisations vitivinicoles nationales à travers un groupe de travail créé à l'initiative des responsables de FranceAgriMer et de l'Institut national de l'origine et de la qualité (INAO). Les travaux scientifiques, les conclusions des ateliers régionaux de prospective et les 2700 leviers d'action identifiés, ont ainsi été diffusés et analysés pour co-construire une stratégie pour le secteur.

Les responsables professionnels ont choisi, conformément aux ateliers régionaux, de favoriser un scénario basé sur l'innovation, afin de préserver les fondements du modèle français. Ils ont alors proposé de consulter de nouveau les acteurs des instances viticoles régionales (Comités Régionaux INAO et Conseils de bassin), pour préciser cette fois les actions engagées ou souhaitées, selon un cadre d'actions en huit domaines : la connaissance des terroirs et de la localisation des vignobles, les conditions de production, le matériel végétal, les « process » de vinification, le marketing, le soutien à la R&D, l'atténuation (réduction des émissions de gaz à effet de serre), la formation-communication-information.

Cette consultation, analysée par le groupe de prospective de LACCAVE (Aigrain et al., 2021), a été organisée par un groupe plus politique qui s'est chargé ensuite de la rédaction finale du plan stratégique, présenté au Ministre de l'Agriculture le 26 août 2021. Cette « stratégie nationale d'adaptation » s'appuie donc sur les travaux de LACCAVE pour organiser les demandes du secteur en termes de R&D et anticiper les besoins d'évolution réglementaire face au changement climatique. La démarche a aussi été présentée au plan international notamment dans le cadre de l'OIV (Organisation Internationale de la Vigne et du Vin). Elle fait aussi figure d'exemple très observé par d'autres secteurs (contributions aux travaux de l'ADEME ou de l'ONERC par exemple).

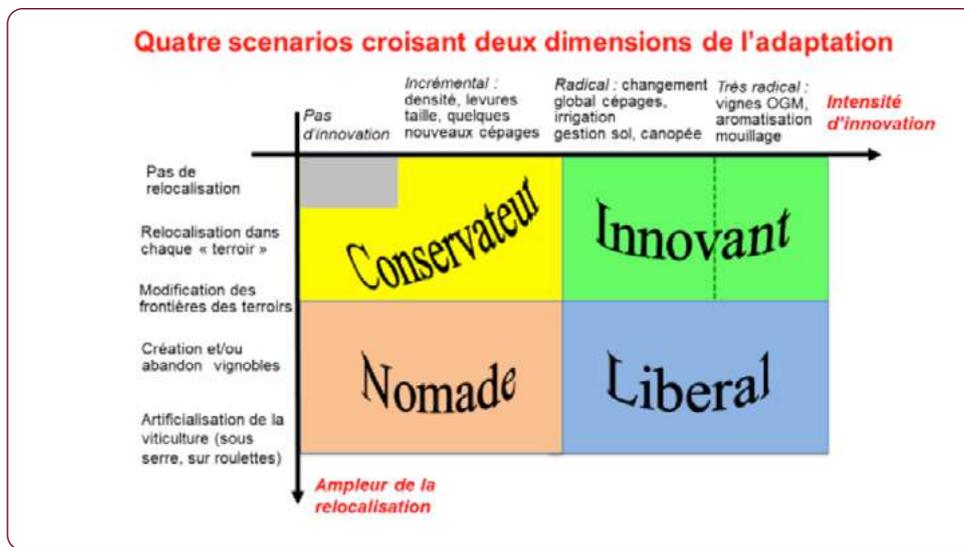


Figure 8.10. Les discussions par table lors du Forum pour la viticulture du Languedoc face au changement climatique, Mas de Saporta, 22/11/2017. (Source : J.-M. Touzard)



CHAPITRE

9

TOURISME

Coordination : Émeline HATT et Vincent VLÈS

Rédaction : Coralie ACHIN, Solène ALBERT, Alexandre BRUN, Carlo M. CARMAGNOLA, Hugues FRANÇOIS, Emmanuelle GEORGE, Steve HAGIMONT, Joël IDT, Jules-Mathieu MEUNIER, Samuel MORIN, Lucie RENOU, Hélène REY-VALETTE, Laura ROUCH, Raphaëlle SAMACOÏTS, Bernard SCHÉOU, Jean-Michel SOUBEYROUX.

Le tourisme, la protection et la transformation de l'environnement pyrénéen : perspectives historiques

Steve HAGIMONT (UVSQ - CHCSC)

Le tourisme a d'un côté été un atout pour l'environnement pyrénéen permettant de valoriser, depuis la fin du XVIII^e siècle, des ensembles paysagers de manière plus douce que les exploitations forestières ou que l'industrie. D'un autre côté, devenu l'activité hégémonique, le tourisme a contribué à transformer les écosystèmes et nourrit une hausse des mobilités carbonées. Le tourisme a permis de justifier la protection de l'environnement et motivé des résistances à des aménagements qui menaçaient l'intégrité des paysages. L'industrie hydroélectrique et électrométallurgique affrontent ainsi, dès avant 1914, les acteurs du tourisme. Gavarnie et Cauterets sont ainsi préservés, quand Luchon ou Ax échouent.

Le Parc national des Pyrénées, créé en 1967, est d'abord porté localement pour s'opposer à l'hydroélectricité. Les négociations houleuses permettent de faire primer les intérêts agricoles et touristiques dans le règlement et le tracé même. En même temps, avec la déprise industrielle et agricole, le tourisme devient l'activité essentielle de bien des vallées et donc un facteur essentiel de perturbation des milieux. Dès le début du XIX^e siècle, le tourisme estival se déploie autour de sites thermaux comme Luchon, Bagnères, Cauterets, Barèges ou Gavarnie. Les arasements de forêts pour financer les thermes, les routes et les plans d'urbanisme, l'artificialisation de terres agricoles, l'accroissement de l'exposition aux risques, le déversement d'ordures et d'eaux usées, la présence de centaines de chevaux d'excursion, les prélèvements et introductions de gibiers et de poissons, les chemins de fer, renouvellent les pressions anthropiques (Hagimont, 2021).

Au XX^e siècle, les automobiles s'ajoutent aux trains et accentuent la dépendance structurelle du tourisme aux



Station des Angles. Crédit photo : V. Vlès.

transports carbonés. Si dans les années 1960 encore, la majorité des déplacements touristiques domestiques se font en transports en commun, tout est fait pour faciliter les déplacements automobiles en finançant largement les aménagements routiers. Sur le modèle des villes, les lotissements étalent les urbanisations dès l'entre-deux-guerres, comme à Luchon, Ax ou Font-Romeu. S'ajoute à ce tourisme estival la saison d'hiver. Dès 1945, un fait est acquis pour les services de l'Etat : les Pyrénées ne sont pas adaptées à l'exploitation du ski alpin car leurs sites et l'enneigement y sont trop limités. Cela n'empêche pas les centres de se multiplier dans les trois décennies suivantes, portés souvent par les communes (y compris thermales) ne voyant pas d'autre solution pour relancer l'économie locale.

Des entrepreneurs se lancent aussi, comme aux Agudes, à Ascou ou aux Monts-d'Olmes, le seul enjeu pour eux étant d'obtenir les conventionnements fonciers et de lancer la promotion immobilière. Peu importe la neige finalement, la prime est au béton. Les difficultés d'exploitations des remontées mécaniques retombent en tout cas sur les collectivités qui doivent assumer des pertes d'exploitation croissantes à partir des années 1980 et s'engager dans une course à la neige de culture et aux remontées mécaniques. Dès ces années, des programmes de diversification plurisaisonniers sont élaborés à l'échelle des vallées mais échouent par manque de volonté politique, d'investissements et de réponse du public.

Les nuages semblent alors s'amonceler sur le tourisme. Le public intéressé par les sports d'hiver commence à stagner. Le tourisme estival, sur fond de crise thermale, est plus diffus et moins rémunérateur ; il commence à poser le problème de la saturation de certains sites facilement accessibles comme les Bouillouses, Néouvielle ou Gavarnie. Les équipements touristiques apparaissent comme des services publics non rentables mais essentiels à la survie économique des vallées. La dépendance envers les investissements faits dans le passé, l'assèchement de l'imaginaire et des finances empêchent d'inventer autre chose. **Les enjeux climatiques et de biodiversité complexifient l'orientation des investissements touristiques**, laquelle pourrait tirer parti des nombreuses initiatives en faveur du tourisme diffus depuis les années 1960, dont le bilan reste à dresser (Hagimont et al., 2021).

L'impact environnemental et social des mobilités touristiques d'Occitanie d'ici 2030

Bernard SCHÉOU (UPVD - Art-Dev)

Nous entendons les mobilités touristiques comme l'ensemble des déplacements des touristes, entre le départ de leur domicile et leur retour, et ce, quel que soit leur lieu de résidence (selon la définition du système d'observation statistique français du tourisme, un touriste est un visiteur qui passe au moins une nuit hors de son domicile, quel que soit le motif de son déplacement).

Les mobilités touristiques forment un ensemble multiforme, composé des déplacements pour venir sur le lieu de vacances, ainsi que de tous les déplacements effectués ensuite sur place. Cela les rend difficiles à reconstituer dans leur totalité par des enquêtes par questionnaire, seul moyen de pouvoir les relier avec les différentes caractéristiques des touristes qui en sont à l'origine, ce qui explique le peu d'études existantes sur leurs caractéristiques et ce qui les détermine.

En ce qui concerne la région Occitanie, les données publiées sur les mobilités touristiques sont peu détaillées : nous disposons, pour l'année 2019, des nuitées touristiques, réparties selon les régions ou pays d'origine des touristes, et selon le type d'espace fréquenté ([Destination Occitanie, 2020a](#)) ainsi que de la répartition par mode de transport pour se rendre à destination ([Destination Occitanie, 2020b](#)). En 2019, 24 % des nuitées sont le fait d'habitants de la région, 41 % de résidents d'autres régions françaises, et 35 % de résidents de pays étrangers, dont les $\frac{3}{4}$ sont réalisées par des européens, la part des clientèles lointaines (USA, Chine, Russie...) étant marginale ([figure 9.1](#)). Une majorité des nuitées touristiques (36 %) s'effectuent dans les centres urbains dont l'accessibilité nationale et internationale est facilitée par une bonne desserte aérienne (dont 5 aéroports centrés sur l'international) et ferroviaire (77 liaisons TGV nationales et 5 gares bien reliées à l'Espagne).

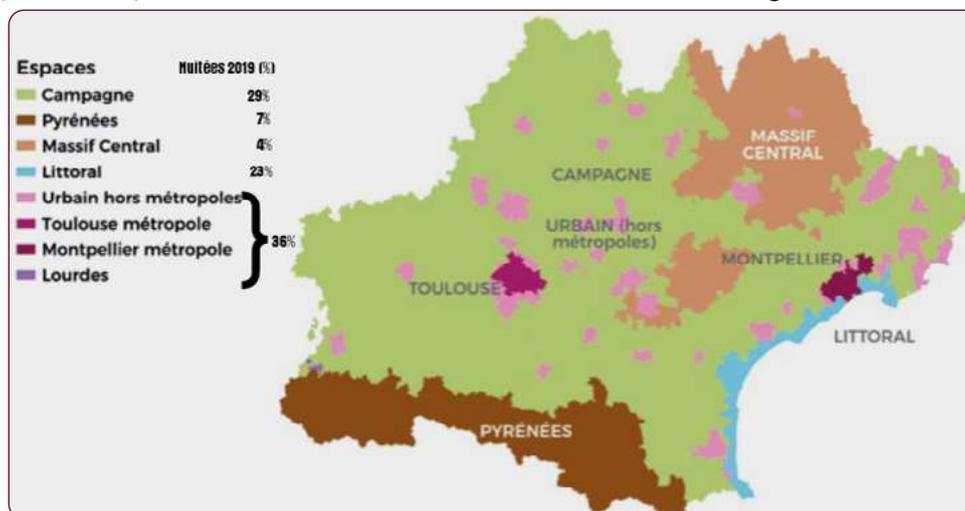


Figure 9.1. Répartition des nuitées touristiques en 2019 par type d'espace fréquenté. (Source : Destination Occitanie, 2020a pour le fond de carte et pour les chiffres.)

Le second type d'espace le plus fréquenté est l'espace rural, avec 29 % des nuitées, suivi du littoral qui concentre 23 % des nuitées, les deux massifs pyrénéen et central accueillant respectivement 7 % et 4 % des nuitées touristiques. **Si l'ensemble du littoral est bien desservi par les transports en commun, c'est nettement moins le cas des espaces ruraux et de montagne, qui sont plus difficiles d'accès.** Le type d'espace de destination influence logiquement le mode de transport des touristes français pour venir en Occitanie : si la part de la voiture particulière domine tous les autres modes de transport avec 84,5 % en moyenne, elle est plus élevée encore chez ceux qui séjournent en espace rural (85 %), sur le littoral (88 %) ou en montagne (89 %).

L'ensemble des modes routiers est même de 90 % si l'on ajoute à la voiture particulière, le camping-car (2,5 %), le covoiturage (2 %) et le car (1 %). La part du train n'est que de 6 % et celle de l'avion de 2 %.

Une étude récente pour le compte de l'agence de la transition écologique (ADEME) a estimé et modélisé l'impact environnemental et social des mobilités touristiques d'Occitanie d'ici à 2030 selon plusieurs scénarii d'évolution par rapport à l'année 2018 de référence ([Diamant et al., 2020](#)). Les auteurs ont retenu comme effets, au niveau environnemental : 1) le changement climatique lié aux émissions de gaz à effet de serre, 2) la pollution atmosphérique locale et 3) les nuisances sonores ; et au niveau social : 1) le temps perdu par la congestion, 2) les accidents et 3) les bénéfices pour la santé (vélo et marche à pied).

Ces différents effets dépendent des distances et des modes de transport choisis. Afin d'estimer leur coût global pour la collectivité, ils ont été monétarisés par l'application de valeurs tutélaires (prix fictifs déterminés collectivement par différents groupes de réflexion publics, par exemple au sein du Commissariat Général au Développement Durable).

Ce coût est de 3,6 milliards d'euros en 2018. Les six scénarios d'évolution retenus sont : 1) « tendanciel », soit la poursuite des tendances actuelles ; 2) « normatif », soit un scénario correspondant à la mise en œuvre de la stratégie nationale bas carbone (SNBC) qui vise la neutralité carbone pour 2050, et quatre scénarii exploratoires ; 3) « tourisme de proximité », soit le remplacement des clientèles étrangères par des clientèles nationales ; 4) « Transports en commun », soit l'augmentation conséquente de la part modale des transports en commun ; 5) « modes actifs », soit l'utilisation de modes actifs pour les déplacements locaux (vélo et marche) et enfin 6) « exploratoire », un scénario co-construit entre les auteurs du rapport et le CRTL d'Occitanie (figure 9.2).

Ce dernier repose sur la stratégie touristique de la région qui d'une part, prévoit de favoriser un tourisme social et de proximité permettant de faire passer la part de la clientèle occitane de 25 % à 35 % pour 2030, une augmentation légère et régulière de la clientèle française et un recul équivalent de la clientèle étrangère, et d'autre part se fixe des objectifs très ambitieux en termes de report modal, visant 1) pour les français et les européens, une baisse de la part de la voiture au profit du train ou du car (avec une part cumulée doublant d'ici 2030 pour les atteindre 13 % pour les français et 8 % pour les européens et 2) le doublement du recours aux transports en communs pour les déplacements sur place.

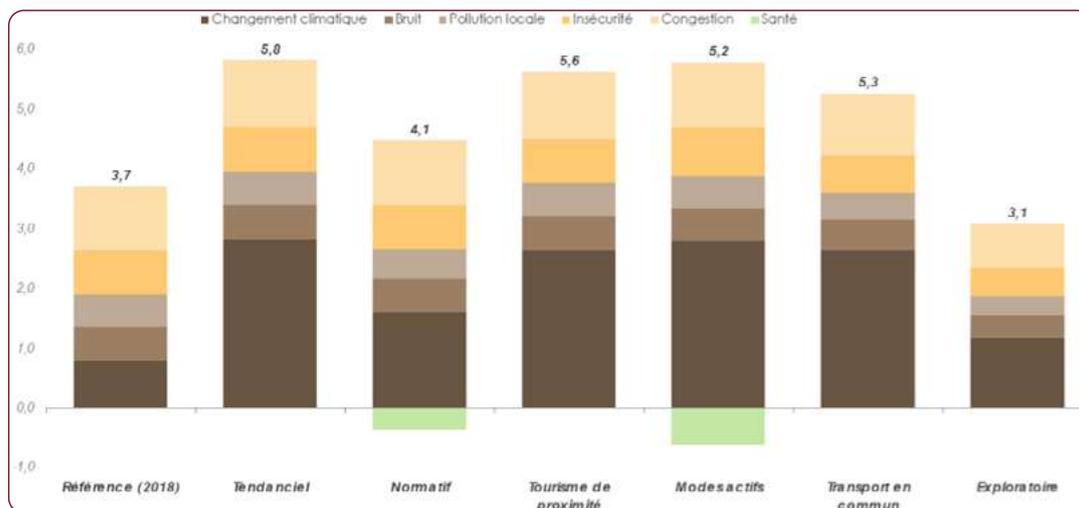


Figure 9.2. Scénarios d'évolution des externalités de la mobilité touristique à horizon 2030 pour l'Occitanie.

(Source : Diamant et al., 2020)

On constate sur la figure précédente que quel que soit le scénario retenu, la part des changements climatiques s'accroît dans les externalités de la mobilité touristique à l'horizon 2030, même si elle s'accompagne d'une réduction d'autres effets négatifs.

Par ailleurs, le scénario co-construit avec le CRTL serait le seul à permettre une baisse du total estimé des effets négatifs des mobilités touristiques en 2030 par rapport à 2018. Malgré le volontarisme de la région, l'effectivité de ce scénario nous semble incertaine, en particulier pour l'objectif de limitation de la clientèle européenne, lequel paraît difficilement contrôlable par la région. Comment pourrait-elle, par exemple, empêcher les nombreux européens qui possèdent des résidences secondaires en Occitanie de s'y rendre ?

En outre, amener les touristes à abandonner la voiture particulière est une tâche ardue qui suppose non seulement d'agir sur l'ensemble de la chaîne des déplacements, du point de départ jusqu'aux déplacements sur place, en proposant des solutions alternatives efficaces, coordonnées et intégrées, mais en plus de les convaincre de changer de comportement malgré de nombreux freins (Rocci, 2014). Dans cette perspective, nous suggérons :

- d'expérimenter la limitation de la circulation des voitures particulières sur des espaces restreints, particulièrement adaptés à un accès en transports en commun et à une circulation locale sans voiture (exemple des stations sans voitures du réseau Alpine Pearls) ;
- des actions de mobilisation des professionnels volontaires, en particulier les hébergements, en s'inspirant du programme « en Bretagne sans ma voiture » (ADEME Bretagne, 2017) ;
- la mise en place d'une agence de la mobilité, afin d'offrir un service d'accompagnement personnalisé au changement modal, tant pour les mobilités touristiques que pour les mobilités quotidiennes.

Si ce premier travail réalisé sous l'égide de l'ADEME permet de disposer d'une première approche relativement grossière des externalités générées par les mobilités touristiques, **la mise en place d'actions à la hauteur de l'enjeu climatique suppose au préalable, la production d'une connaissance scientifique plus fine des mobilités touristiques et de leurs déterminants**, qui résultent de processus de décision complexes, à travers la diffusion des données existantes aux chercheurs et la mise en place de programmes de recherche spécifiques.

Les stations touristiques ont-elles un plan de repli ?

Alexandre BRUN (UMVP - LAGAM)

Le Conseil régional d'Occitanie et la Banque des Territoires ont constitué une société de participation dans les stations de ski, la Compagnie des Pyrénées, et une foncière pour soutenir les domaines fragilisés par la diminution de l'enneigement. Il s'agit de diversifier les activités pour les quatre saisons et de moderniser l'hôtellerie.

La première station concernée est le Grand Tourmalet. La crise sanitaire a du reste remis en selle le ski de fond et les stations familiales de moyennes altitudes : les retours d'expériences seront utiles pour déployer un « plan de repli » plus global à l'échelle de l'Occitanie. **Le tourisme de fraîcheur, combiné par exemple au thermalisme ou bien aux sports d'eaux vives, est un marché prometteur** – même s'il ne faut pas en surestimer le potentiel commercial.

La situation des stations balnéaires face aux conséquences des changements climatiques est complexe. La plupart des stations balnéaires, implantées de façon localisée dans la deuxième moitié du XIX^e siècle puis massivement dans l'entre-deux guerres et surtout à partir des années 1960, sont tournées vers la plage (**figure 9.3**). Celles de deuxième génération ont été conçues ou modernisées dans le cadre de la Mission Racine pour littoraliser l'économie régionale de l'ex-région Languedoc-Roussillon.

Agde, par exemple, compte 29 000 habitants permanents (2018) et presque dix fois plus l'été, pour beaucoup au Cap d'Agde, station fantôme l'hiver. Leur reconversion, leur diversification et encore moins leur « recul » ou leur « recomposition », n'ont pas été prévus à l'époque des Trente Glorieuses. En résumé, rien à voir avec les stations de montagne, plus petites et moins stratégiques dans l'économie régionale.

Ni l'organisation des milliers d'immeubles d'habitation où les studios cabines abondent, ni la composition urbaine des stations balnéaires ne faciliteront le chantier de l'adaptation qu'imposent autant le vieillissement des équipements que les effets des changements climatiques. La Grande Motte semble réussir le pari de la ville hybride, c'est-à-dire comprenant de plus en plus d'habitants permanents tout en conservant son statut de station balnéaire.

Mais toutes les stations ne sont pas aussi riches. Au demeurant, toutes n'ont pas bénéficié du traitement architectural et urbain de la Grande Motte – exceptionnel – ou de sa localisation, avantageuse, dans l'orbite de Montpellier. Il subsiste de surcroît de légitimes interrogations chez les élus locaux, les gérants d'hôtels et de cam-

pings et les estivants eux-mêmes au sujet de la nature, de l'ampleur et des temporalités propres aux effets des changements climatiques. La mer monte, certes, mais à hauteur de quelques millimètres par an.

En résumé, c'est un processus invisible. Comment, dans ce contexte, mobiliser les pouvoirs locaux ? C'est pourquoi, jusqu'à présent, les territoires n'ont pas reculé. Pour aller où, au reste ? Dans les zones de l'arc rétro-littoral – encore non bâties précisément parce qu'elles sont exposées aux incendies, aux crues violentes des fleuves côtiers ou réservées à l'agriculture ou au maintien de la biodiversité ?

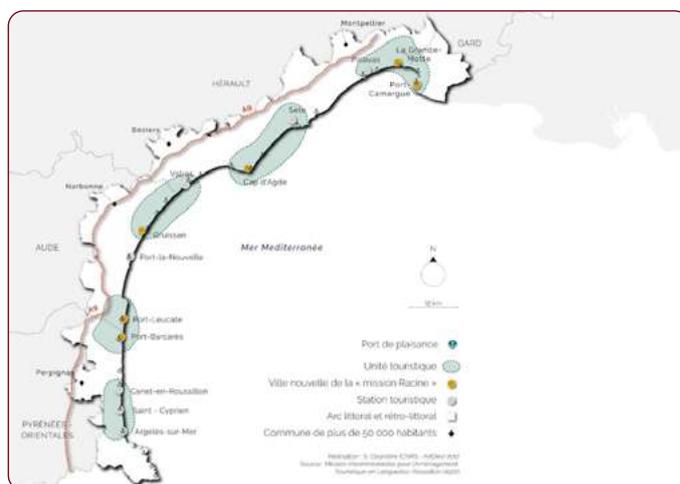


Figure 9.3. Plan d'aménagement touristique de la côte du Golfe du Lion.

(Source : © Stéphane Coursière et Llewella Maléfant)

Les tempêtes à l'origine des phénomènes de submersion marine surviennent quant à elles, majoritairement en hiver lorsque la côte est désertée de ses vacanciers. Par conséquent, le risque, même s'il existe, est relativement limité. En revanche, le recul de la majorité des plages constitue un enjeu majeur car c'est là que se concentrent les activités.

La plage reste la principale source de revenus de l'économie balnéaire : impossible de s'en passer, quitte à la recharger périodiquement et à affronter les controverses soulevées par des habitants et des touristes plus sensibles aux arguments écologiques et relayés par la presse régionale. **Paradoxalement, le problème de l'érosion est moins directement lié aux changements climatiques qu'au fait d'avoir urbanisé de façon massive des côtes particulièrement mobiles car majoritairement basses et sableuses.**

Économie et vulnérabilité des plages face à la submersion marine

Hélène REY-VALETTE (UM - CEE-M)

Les plages ont un rôle déterminant pour l'attractivité touristique et récréative des communes littorales. Avec les cordons dunaires auxquels elles sont généralement associées, elles constituent aussi une source de biodiversité et une infrastructure naturelle de protection par rapport aux effets des tempêtes. Lorsqu'elles sont naturelles, leur mobilité leur permet de s'adapter à une augmentation progressive du niveau de la mer. À l'inverse, en fonction de leur taille ou de leur pente, les plages des secteurs urbanisés peuvent être très vulnérables et à terme disparaître du fait de l'aggravation des processus d'érosion et de submersion générés par l'augmentation du niveau de la mer. En Occitanie, les plages largement ouvertes, sont particulièrement vulnérables. **Pour 1 mètre d'augmentation du niveau de la mer en 2100 et dans un scénario d'absence d'adaptation planifiée, c'est 27 % de la surface des plages qui serait perdue**, avec des résultats très différenciés allant de 5 % à 50 % selon les communes (Rey-Valette et al., 2016).

Les conséquences économiques de cette vulnérabilité sont importantes, mais difficiles à estimer du fait de l'absence de suivi des flux de fréquentation, des retombées économiques, et plus généralement de la valeur des services écosystémiques rendus par les plages. Les usages et les stratégies d'aménagement et de conservation des plages (construction d'épis et de brise-lames, rechargement...) doivent être appréhendés en analysant les solidarités économiques et territoriales qu'elles impliquent entre les collectivités littorales et rétro-littorales à différentes échelles. Une estimation des valeurs d'usage des plages a été réalisée en 2009 (projet MISEEVA coordonné par la BRGM) à partir d'enquêtes visant à évaluer les

consentements à payer des usagers pour le maintien des services récréatifs et des services de protection des plages. La valeur accordée par les résidents principaux et secondaires à la protection contre les tempêtes s'élève à 2,1 millions €/hectare tandis que leur valeur récréative pour l'ensemble des usagers (résident principaux et secondaires, touristes et excursionnistes) s'établit à 3,3 millions €/hectare (euros 2010). **Le cumul de ces deux fonctions permet d'estimer la valeur d'usage d'un hectare de plage à 5,4 millions €, et dès lors, l'effet du changement climatique (perte maximale de 27 %) à l'échelle régionale à 2,43 milliards €** (euros 2010) (Rey-Valette et al., 2016).

Outre cette valeur d'usage rendant compte de leurs fonctions, les plages génèrent aussi de nombreux emplois directs et indirects et d'importants flux financiers dans l'économie locale liés aux chiffres d'affaires des activités présentes sur les plages ou à proximité immédiate (concessions, restaurants, vendeurs ambulants) et aux budgets dépensés par les collectivités pour le maintien des plages (rechargement, épis, ganivelles...) et en lien avec les services offerts par les collectivités (postes de secours, nettoyage des plages, toilettes et douches, aires de jeux, aménagements handicapés...). Néanmoins, ces flux sont difficiles à évaluer en l'absence de comptabilité analytique au sein des collectivités. À moyen terme face aux coûts croissants de rechargement, **il s'agira pour les plages urbaines de mettre en œuvre des politiques d'adaptation impliquant la relocalisation des biens et infrastructures les plus exposés** afin de réduire la vulnérabilité des plages et maintenir l'attractivité de ces territoires.

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Réorganiser le territoire pour renaturer le site emblématique du Petit Travers - 34

Conservatoire du littoral - [En savoir plus](#)

Site emblématique du tourisme littoral méditerranéen dès la fin des années 1960, le site du Petit Travers a petit à petit été dégradé par la sur-fréquentation (environ 1 million de visiteurs par an) et les usages anarchiques. Pour faire face à ces problématiques accentuées par un contexte d'érosion du littoral (lié à la construction de digues et d'épis en amont du transit

sédimentaire entre 1970 et 1995), un ensemble d'actions de renaturation du cordon dunaire et de réorganisation complète de l'accueil sur le site a été mené jusqu'en 2015, avec notamment la suppression d'un tronçon de la route départementale construite sur la dune. 5 ans après, la résilience et la naturalité du cordon et des milieux d'arrière-dunes s'expriment nettement. La dynamique côtière, avec l'engraissement à l'est et l'érosion à l'ouest, se poursuit dans un contexte géomorphologique rendu plus souple par l'aménagement. Le cordon dunaire semble avoir retrouvé une partie de sa mobilité nécessaire à l'adaptation au changement climatique.



projet qui s'inscrit dans
une logique de
Sain

Les petites villes littorales en situation de dépendance très forte au tourisme : le cas de Marseillan

Joël IDT (*UGE - Laburba*), Jules-Mathieu MEUNIER (*UGE - Laburba*), Lucie RENOUE (*UGE - LATTs*)

L'organisation de la société locale de Marseillan, petite ville littorale de l'Hérault, est profondément marquée par le tourisme, sous différents aspects. Depuis l'après guerre, il a été le principal moteur du développement de la commune. L'économie locale repose essentiellement sur l'industrie touristique.

Toutes les politiques d'aménagement du territoire ont été orientées vers le développement de celle-ci, comme l'illustre la création et l'aménagement de Marseillan Plage, la station balnéaire, située à 5 km du centre villageois ancien au bord de l'Étang de Thau, et qui concentre 75 % des résidences secondaires, les 19 campings et la majeure partie des commerces et des activités saisonnières.

Marseillan se caractérise aussi par l'importance des variations démographiques dues au tourisme. La population présente sur le territoire communal passe d'environ 8000 en hiver à près de 60 000 au plus fort de la saison. Le tourisme joue ainsi sur la sociologie de la population. Au quotidien, les habitants permanents souvent natifs de Marseillan côtoient aussi bien des touristes occasionnels que des néo-retraités ayant acquis une résidence à Marseillan pour y vivre toute ou partie de l'année. Enfin, la gestion au quotidien de la commune est rythmée par l'organisation et le déroulement de la saison touristique. Les politiques locales et la gestion urbaine (de l'aménagement urbain à la gestion des réseaux, en passant par la sécurité, les commerces ou la santé) sont orientées par les questions touristiques.

A plus long terme, le tourisme est au cœur des perspectives d'évolution du territoire et des instruments de planification. Notre recherche dans le cadre du programme POPSU Territoire montre à quel point Marseillan s'inscrit dans un sentier de dépendance au tourisme, à la fois par la présence très forte des infrastructures matérielles (à commencer par le parc de résidences secondaires mais aussi les locaux commerciaux ou les équipements de loisirs) et par l'organisation sociale (activités quotidiennes des habitants, temporalités sociales, organisation de l'action collective et des acteurs, etc.) (**figure 9.4**).

Cette situation n'est pas sans poser problème ou engendrer d'effets pervers :

- dualisation de la société locale entre habitants historiques et nouveaux venus ;
- tensions entre les activités touristiques dominantes et les secteurs économiques minoritaires ;

- pression sur l'urbanisation et sur les besoins en logements (Marseillan est tiraillée entre une attractivité touristique et résidentielle croissante et une restriction drastique des possibilités d'urbanisation nouvelle, ce qui contraint une partie des habitants – les jeunes ménages notamment – à s'éloigner du littoral pour s'installer dans l'arrière-pays) ;

- effet pervers en matière d'environnement (les efforts d'adaptation vers un tourisme plus respectueux de l'environnement ne viennent pas alléger la pression du tourisme de masse qui reste la clef de voute du fonctionnement du territoire) ;

- tension entre un modèle économique condamné à terme et des politiques intégrant le risque de submersion marine qui peinent à voir le jour (en dépit de l'émergence de cette préoccupation au niveau des services de l'État et d'une partie de la population, les acteurs locaux ont des difficultés à porter ce sujet, tant politiquement qu'opérationnellement, et à l'intégrer dans leurs politiques et leurs projets d'aménagement) (*Idt et al., 2021*).

Le cas de Marseillan est emblématique de la situation de nombreuses petites villes littorales dont la trajectoire de développement est similaire. Notre recherche-action a été réalisée en partenariat avec la municipalité de Marseillan, via des rencontres et des visites de terrains régulières avec les acteurs locaux, ainsi qu'à travers l'organisation d'un séminaire-débat partenarial entre acteurs et chercheurs, dans le but notamment de mettre en regard le cas de Marseillan avec celui d'autres communes touristiques du littoral languedocien.

Ce partenariat a permis de pointer et de mettre en discussion les problèmes et les difficultés rencontrés, en même temps que des pistes de travail possibles pour l'action publique locale : la requalification des infrastructures touristiques (et en particulier du parc de résidences secondaires) comme levier d'adaptation du territoire aux risques liés au changement climatique, l'amélioration de la connaissance et de la prise en compte des transformations démographiques locales dans les outils de planification urbaine, la mutualisation des problèmes liés au tourisme (entre communes littorales voisines autant qu'entre communes littorales et rétro-littorales), domaine qui demeure dans une large mesure aujourd'hui un pré-carré communal alors que les effets pervers sont collectifs.

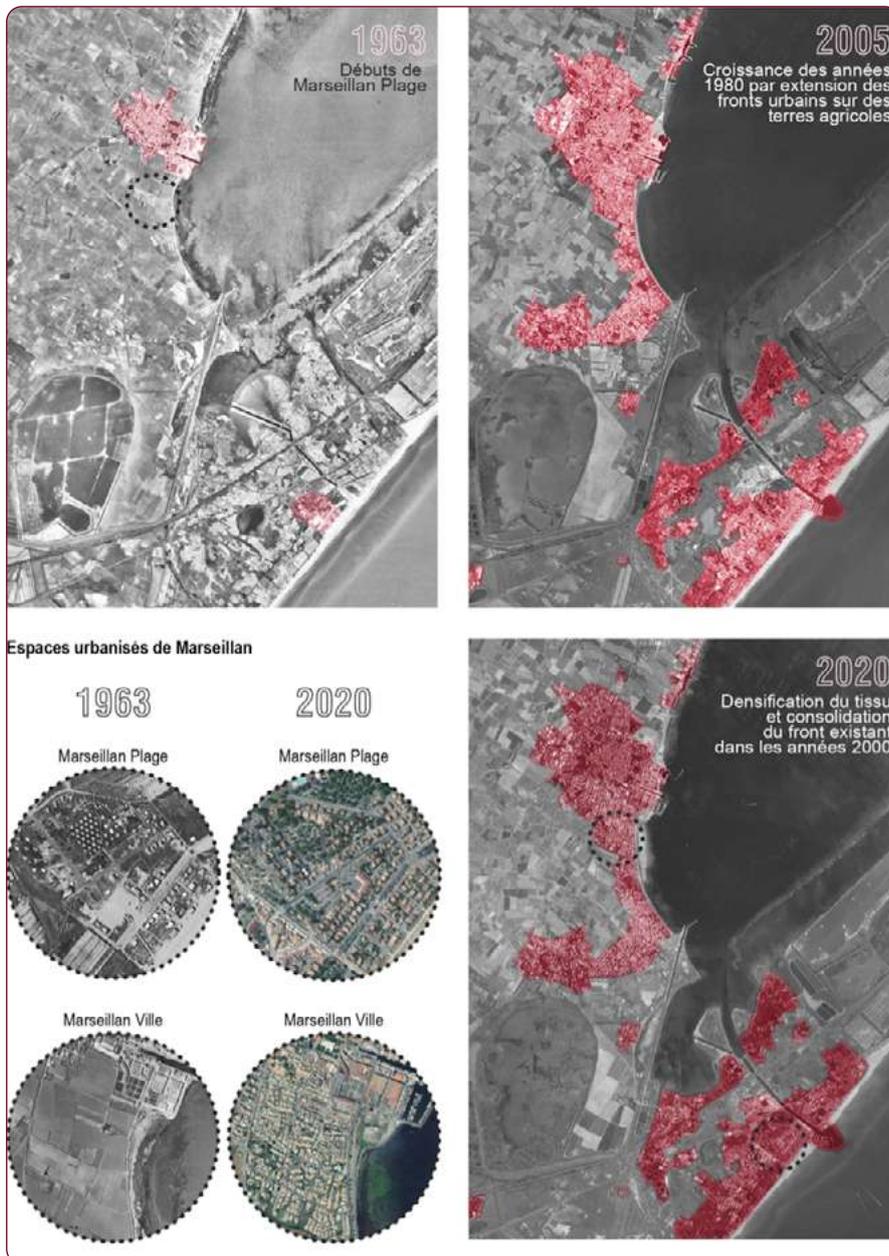


Figure 9.4. Processus d'urbanisation de Marseillan. La croissance urbaine s'opère par extension jusqu'à début des années 2000 en investissant massivement le littoral, avant de procéder ensuite par densification des secteurs déjà urbanisés. (Source : agence Alphaville, 2020)

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Une reconversion en station « 4 saisons » pour s'adapter au changement climatique et diversifier l'offre touristique - 30

AIGOUAL QUALITÉ 1567 - [En savoir plus](#)

La station Alti Aigoual, de par son emplacement géographique, a un rôle majeur à jouer pour assurer des activités de montagne responsables et de proximité pour la population du Gard, de l'Hérault et de la Lozère. Un rôle local, également, de poumon économique, social et touristique pour le pourtour du massif de l'Aigoual qui en a fortement besoin.

Cela passe par une reconversion en station quatre saisons pour s'adapter aux enjeux du changement climatique, même si l'hiver reste une saison d'avenir sur le massif de l'Aigoual. Depuis le 1^{er} mai 2019, la société Aigoual Qualité 1567 (en délégation de service public), en partenariat notamment avec la Communauté des Communes de l'Aigoual Terre Solidaire, s'y emploie. La situation sanitaire a empêché de démontrer toute la pertinence des investissements en cours sur la partie hivernale, par contre, l'été 2021 a été une belle première sur le massif avec un vrai début de vie qui s'est installé sur la station grâce, entre autre, à la location de vélo à assistance, l'accro-filet, etc.



Le virage de la diversification touristique dans les massifs : un renouvellement des trajectoires territoriales des stations

Emmanuelle GEORGE (UGA – INRAE LESSEM), Laura ROUCH (UGA – INRAE LESSEM), Coralie ACHIN (UGA – INRAE et commune de Valloire), Hugues FRANÇOIS (UGA – INRAE LESSEM).

Le tourisme de sports d'hiver a profondément structuré le développement et l'aménagement des territoires de montagne français, et ce depuis plus de 50 ans. Passée la phase d'expansion dans le prolongement de l'Après-Guerre, les années 1990 ont marqué l'engagement dans la période de gestion du parc de stations existant, et ce, dans le prolongement des premières difficultés apparues dès les années 1980. Ces dernières concernent les premiers hivers sans neige, le tassement de la fréquentation touristique, les premières méventes immobilières mais interrogent également les capacités financières des collectivités locales.

Dans ce contexte d'incertitudes, la notion de diversification touristique s'affirme dès les années 2000, comme une stratégie visant à moins dépendre du ski. Après une volonté initiale de structurer une forme de tourisme « 4 saisons », la diversification touristique s'est rapidement recentrée sur deux saisons en privilégiant le développement de la fréquentation estivale à une échelle territoriale élargie (Achin, 2015). L'enjeu est alors de mobiliser les ressources territoriales, dans une perspective de spécification de l'offre touristique (François, 2008). Pour leur mise en œuvre, ces démarches de diversification touristique ont reposé sur des initiatives individuelles mais ont aussi été soutenues par plusieurs dispositifs d'action publique. La mise en œuvre de la diversification a dû composer avec la diversité des contextes, des enjeux et des trajectoires territoriales de développement. Ainsi, en fonction du poids du tourisme neige dans l'économie locale, les vulnérabilités du secteur touristique ont pu expliquer que le Commissariat de massif des Pyrénées (CMP) ait encouragé en 2007 la structuration de pôles touristiques, organisés autour des stations considérées comme des locomotives et visant la constitution de territoires de projet (CMP, 2007). Au même moment, la région Rhône-Alpes, via son dispositif Contrat Stations Durables ciblait principalement la gouvernance et la professionnalisation des acteurs à l'échelle des stations.

Le Massif central, davantage orienté sur l'agriculture, s'est emparé du tourisme en 2015 via les Pôles de pleine nature, pour valoriser des formes de tourisme plus doux et attirer de nouvelles populations résidentes. Dans le massif des Alpes, initialement focalisée sur l'échelle de la station, la diversification s'est ensuite déportée à une échelle territoriale élargie avec le concept des Espaces Valléens. Aussi, en fonction des situations particulières dans les différents massifs, à des rythmes différents, la convergence projet de territoire / projet touristique, et in fine la possible assimilation entre territoire de projet et destination touristique, a progressivement guidé la détermination de l'échelle de mise en œuvre de la diversification.

En termes d'activités et de produits, et avec un recul de plusieurs décennies, force est de constater que la

dynamique de diversification touristique repose essentiellement sur des activités et des prestations au final assez similaires. Les activités de pleine nature (randonnées pédestres ou à vélo) constituent les principales activités développées dans les stations et les territoires de projet (et plébiscitées par les prestataires touristiques locaux). En parallèle, les activités relevant de la diversification peuvent aussi être synonymes d'investissements pour la création d'équipements et infrastructures, témoignant de l'implication forte des pouvoirs publics dans le domaine du tourisme, à l'image de centres aqualudiques ou de musées (Achin et al., 2018). **Cette tendance à l'uniformité s'inscrit dans une forme de mimétisme, découlant de la recherche, dans la diversification, d'un nouveau mode de développement local par lequel les territoires pourraient bénéficier de retombées économiques comparables à celles ayant contribué à la dynamique de développement des stations de sports d'hiver.**

Les processus de diversification, spontanés comme soutenus politiquement, ont amené des recompositions territoriales, interrogeant la centralité des sports d'hiver au sein de territoires de projet comme le renouvellement de la gouvernance touristique et territoriale. En effet, la mobilisation de ressources issues des secteurs agricole, culturel ou de l'environnement contribue à élargir le système d'acteurs et à mettre en exergue les visions différenciées du territoire et de son futur. Cela questionne les capacités collectives des acteurs à travailler, agir et apprendre ensemble, dans une logique de territoire apprenant (Rouch, 2021). In fine, l'ensemble des choix réalisés localement (liés aux formes comme à la gouvernance de la diversification) interrogent l'ampleur des retombées économiques et territoriales escomptées. Ainsi, dans le contexte actuel de transition territoriale pouvant dépasser le cadre du secteur touristique, notamment en lien avec la relocalisation d'activités agricoles et/ou artisanales, le développement de dynamiques résidentielles mais également les évolutions des modes de vie ou des mobilités, **l'enjeu est bien d'évaluer les recompositions à l'œuvre ainsi que leurs bénéfiques et impacts pour les territoires concernés, notamment en termes de trajectoires d'évolution** (George-Marcelpoil et al., 2016).

NB : cette contribution se fonde sur des résultats issus de nos travaux de recherche sur les processus de diversification touristique à l'œuvre dans les Espaces Valléens du massif alpin, en termes de nature de l'offre de diversification comme de leur gouvernance. Au-delà des contours du dispositif d'accompagnement surnommé Espaces Valléens mis en œuvre dans le cadre du POIA (Programme Opérationnel Interrégional des Alpes), la notion d'espace valléen contribue à renouveler la vision des dynamiques de développement du tourisme de montagne et de la place relative qu'y occupent les stations de sports d'hiver. L'enjeu est de mettre en perspective ces résultats avec les dynamiques présentes en Occitanie, sans pour autant nous prévaloir d'analyses en Occitanie aussi fines que celles menées dans les Alpes.

Perspectives d'enneigement dans les stations pyrénéennes de sports d'hiver

Hugues FRANÇOIS (UGA – INRAE LESSEM), Raphaëlle SAMACOÏTS (Météo-France - DCSC), Carlo M. CARMAGNOLA (UGA - Météo-France CEND), Jean-Michel SOUBEYROUX (Météo-France - DCSC), Samuel MORIN (Météo-France et CNRS – CNRM).

Directement dépendantes de la ressource neige et moteurs économiques de nombreux territoires de montagne, les stations de sports d'hiver font l'objet d'une attention particulière parmi les études d'impact du changement climatique. Comme le souligne le rapport spécial Océan & Cryosphère du GIEC (GIEC, 2019), l'évolution du climat a déjà affecté et affectera au XXI^e siècle l'enneigement des domaines skiables. Cette synthèse souligne une forte diminution du manteau neigeux, notamment à basse altitude par le passé, pour la quasi-totalité des régions de montagne dans le monde. Cette tendance passée devrait se prolonger jusqu'en milieu de siècle puis les conditions pourraient se stabiliser ou poursuivre leur dégradation jusqu'à la fin de siècle, en fonction des scénarios d'émission de gaz à effet de serre (GES). Les résultats présentés ci-après s'appuient ainsi sur le scénario RCP8.5 qui suppose de fortes émissions de GES, le RCP4.5 qui fait l'hypothèse d'une stabilisation des émissions de GES à leur niveau actuel d'ici au milieu du siècle et le RCP2.6 impliquant l'atteinte de la neutralité carbone planétaire d'ici au milieu du siècle.

La diminution tendancielle du manteau neigeux des dernières décennies se superpose à la variabilité inter-

annuelle intrinsèque des conditions naturelles d'enneigement (Lopez-Moreno et al., 2020). Face à une telle variabilité, l'amortissement et la valorisation des importants capitaux sur lesquels repose l'activité des remontées mécaniques est d'autant plus difficile qu'elle s'inscrit dans une saisonnalité fortement marquée par les périodes de vacances. En France, les « hivers sans neige » de la fin des années 1980 ont marqué un tournant dans l'adoption des techniques de production de neige avec pour objectif de sécuriser les conditions d'exploitation. Elles ont depuis pris une place croissante dans les modalités d'exploitation des domaines skiables et il est primordial d'en tenir compte pour analyser l'évolution des conditions d'exploitation des domaines skiables (GIEC, 2019).

Le rapport SROCC souligne que la production de neige a permis par le passé de limiter, en fonction des situations, l'impact du changement climatique sur l'activité des stations de sports d'hiver. Diverses approches ont été développées et mises en oeuvre afin d'évaluer l'évolution de l'enneigement des domaines skiables, reposant sur la descente d'échelle de projections climatiques, la modélisation de l'enneigement naturel et géré, et le calcul d'in-

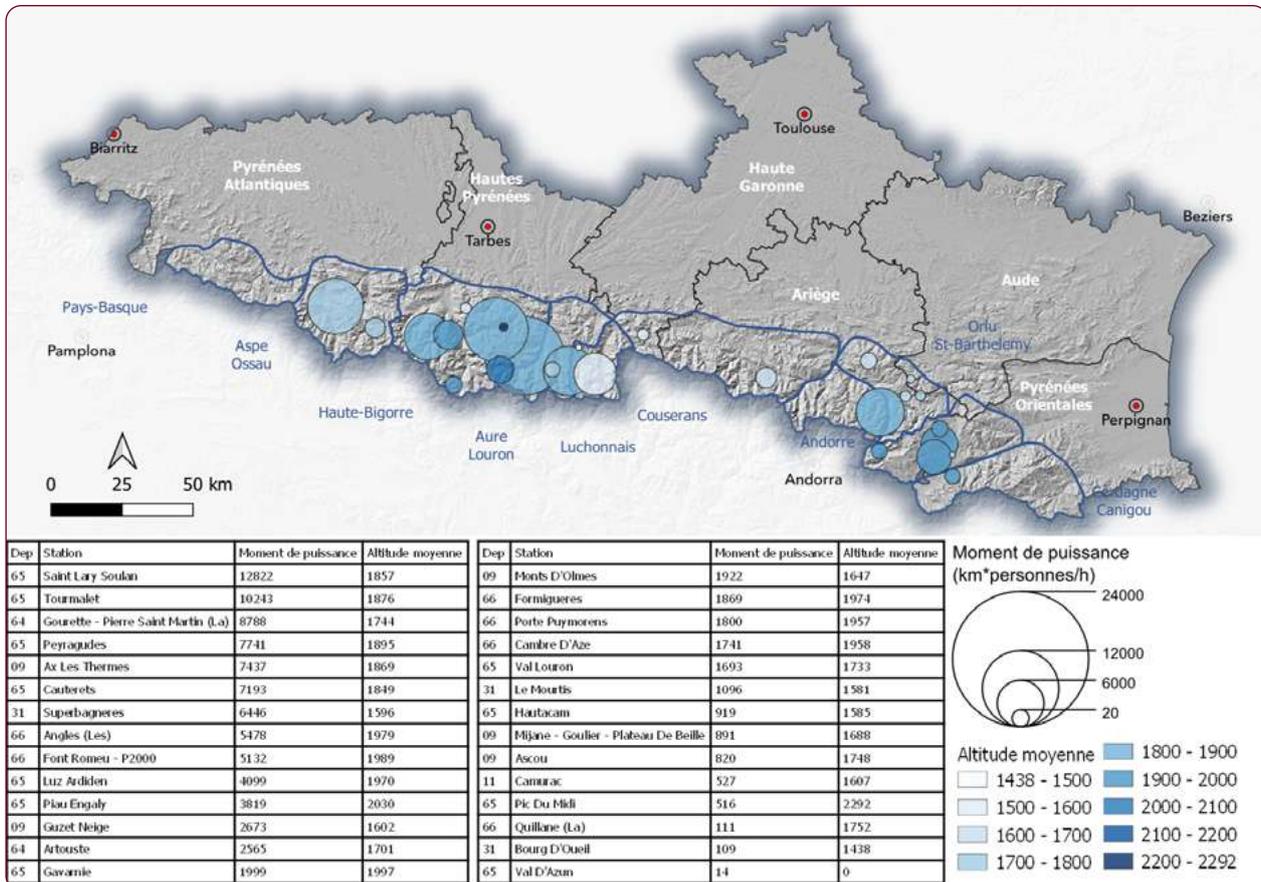


Figure 9.5. Principales caractéristiques des stations des Pyrénées françaises étudiées. (Source : BD Stations (U. Grenoble Alpes, INRAE-LESSEM))

dicateurs pertinents au regard des conditions d'exploitations des domaines skiables (Abegg et al., 2020). La présente approche focalisée sur les Pyrénées françaises mobilise différents outils de modélisation complémentaires. La dynamique du manteau neigeux est simulée en utilisant une version adaptée du modèle à base physique Crocus, dit Crocus-Resort (Spandre et al., 2016), pour intégrer les pratiques de gestion de la neige, damage et production de neige complémentaire aux précipitations naturelles. En entrée de ces simulations, les conditions météorologiques passées sont fournies par la réanalyse SAFRAN (Vernay et al., 2019) qui fournit des informations météorologiques, réparties par tranche d'altitude de 300 m au sein d'entités géographiques unitaires, appelées « massifs », représentés sur la **figure 9.5**.

Ces données tiennent compte des observations météorologiques réalisées dans les Pyrénées depuis 1958. Cette réanalyse a également servi de référence pour paramétrer la méthode de descente d'échelle ADAMONT (Verfaillie et al., 2018) qui a permis de produire des projections climatiques ajustées pour 20 couples GCM-RCM (Global et Regional Circulation Models) issus des simulations Euro-CORDEX (Jacob et al., 2014).

Comme le montre la **figure 9.5**, les stations prises en compte dans l'étude des Pyrénées françaises, enregistrées dans la BD Stations (INRAE), sont au nombre de 28, de taille plutôt modeste. Pour caractériser les stations, Domaines Skiables de France propose une typologie fondée sur le moment de puissance, produit du dénivelé (exprimé en km) et du débit d'un appareil de remontée mécanique qui permet d'évaluer sa contribution au domaine skiable et qui peut être agrégé pour évaluer la taille d'un parc de remontées mécaniques et comparer différentes stations entre elles.

La plupart (15) des stations pyrénéennes sont considérées comme des petites stations (moment de puissance inférieur à 2500 km/pers/h), 6 appartiennent à la catégorie des stations moyennes (entre 2500 et 6000 km/pers/h) et 7 à celle des grandes stations (entre 6000 et 15 000 km/pers/h) mais aucune station ne correspond à une très grande station (au-delà de 15 000 km/pers/h). L'altitude des stations n'est pas directement corrélée à leur taille, les plus élevées se révélant être plutôt parmi les plus petites. Les domaines skiables sont inégalement répartis en fonction des massifs, avec, sur un gradient ouest-est, une concentration occidentale de 14 stations parmi les plus grandes sur quatre massifs puis, plus à l'est, un groupe de 11 stations de taille modeste également réparties sur quatre massifs.

Une étude récente (Spandre et al., 2019a) a analysé l'évolution passée et future de l'altitude de fiabilité de l'enneigement dans les Pyrénées, définie comme l'altitude au-dessus de laquelle la durée d'enneigement naturel ou géré dépasse un certain seuil à une certaine fréquence (n années sur 10). Cette altitude de fiabilité permet de caractériser les stations de sport d'hiver dans

diverses catégories, en fonction de leurs altitudes caractéristiques. **Les résultats montrent que l'altitude de fiabilité de l'enneigement naturel damé sur terrain plat des Pyrénées françaises se situe pour la période de référence 1986-2005 à environ 2000 m d'altitude.** L'amélioration des conditions d'exploitation par la production de neige se révèle relativement faible (-700 m), par rapport aux autres massifs étudiés, soit 1300 m d'altitude (**voir chapitre-enjeu Milieux montagnards**).

Dans le futur, les projections indiquent une dégradation des conditions d'enneigement. Ainsi, en milieu de siècle, l'altitude de fiabilité remonte environ à 2300 m sans production de neige, mais à 1800 m avec production, par rapport à la période de référence et pourrait aller jusqu'à 2750 m, pour le scénario de fortes émissions, en fin de siècle. Ces altitudes de fiabilité sont comparées avec les altitudes caractéristiques des stations de ski (altitudes des hébergements et du domaine skiable).

Dès la période historique, les stations des Pyrénées françaises se démarquent par un enneigement généralement plus précaire que dans les autres massifs étudiés (Alpes du Nord, Alpes du Sud et Pyrénées espagnoles). Les projections indiquent une dégradation sensible des conditions d'exploitation au cours du XXI^e siècle. La différence entre les scénarios RCP8.5 et 2.6 en fin siècle est forte, mais même dans les scénarios de moindre réchauffement, la récurrence des conditions d'enneigement difficiles demeure élevée.

Au-delà de cette approche fondée sur l'étagement de l'enneigement en fonction de l'altitude, pour divers massifs au sein du massif pyrénéen, une méthode plus sophistiquée a été déployée, qui permet de tenir compte plus finement des caractéristiques des domaines skiables. Pour le moment, elle a essentiellement été appliquée dans les stations des Alpes françaises (Spandre et al., 2019b). Elle se distingue de l'approche fondée sur la simple durée d'enneigement, et quantifie la fraction du domaine skiable couverte par une quantité de neige sur les pistes dépassant un certain seuil (correspondant à 20-25 cm de neige damée), en se focalisant sur les périodes de vacances (spécifiquement celles de Noël et de février). Cet indice de fiabilité de l'enneigement est illustré dans la **figure 9.6** ci-après.

L'analyse porte en particulier sur la fréquence de retour des saisons hivernales dont l'enneigement est comparable aux hivers délicats de la période de référence 1986-2015 (seuil fixé à l'enneigement rencontré 20 % des saisons, noté Q20), qui est une approche beaucoup plus pertinente pour l'activité des domaines skiables que l'évolution de la moyenne multi-annuelle de l'enneigement. Pour l'application de cette méthode dans les Pyrénées le taux de couverture du domaine skiable par les équipements de production de neige est fixé à 30 % quelle que soit la période considérée.

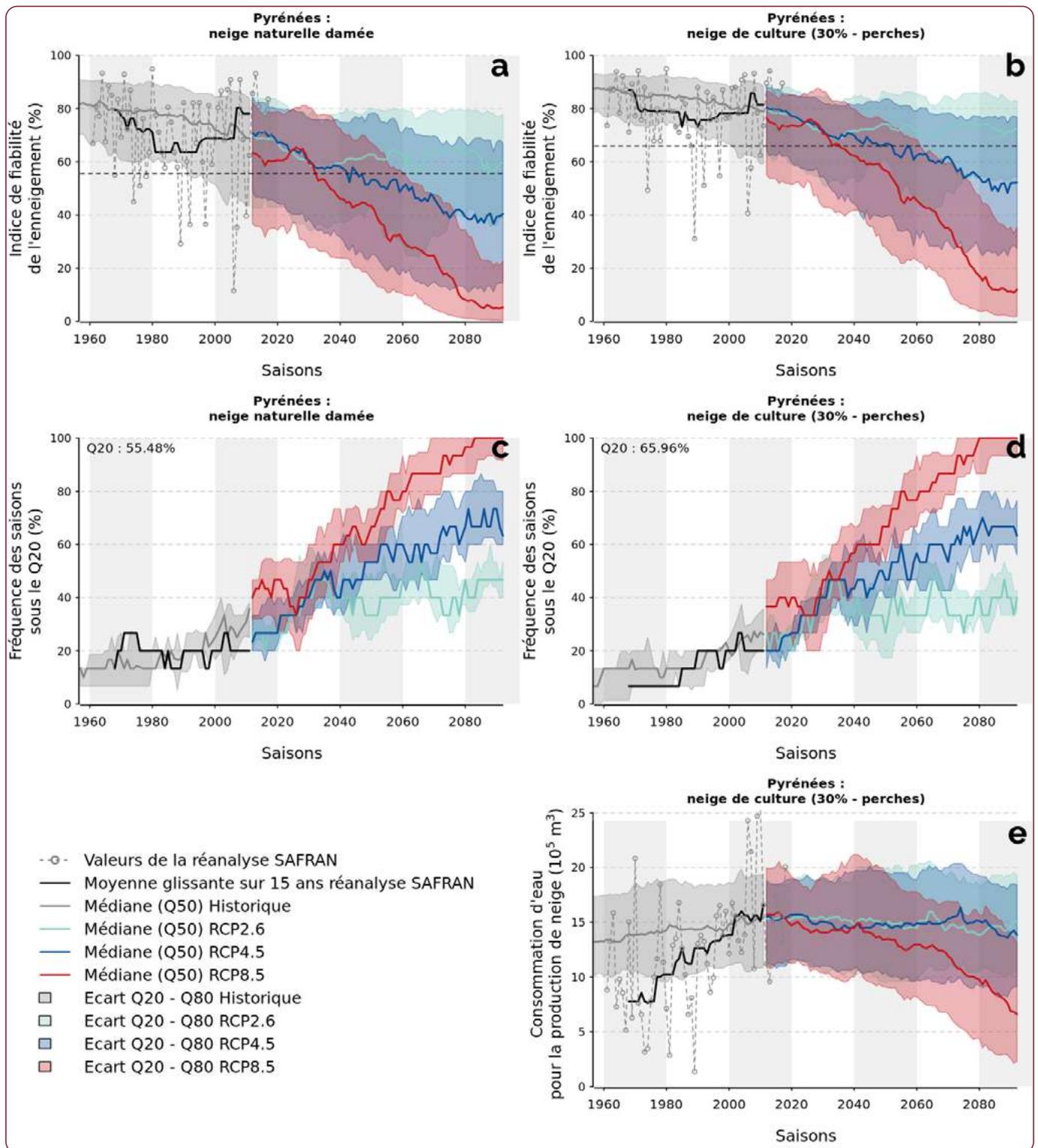


Figure 9.6. Évolution des conditions d'enneigement des stations des Pyrénées françaises dans le contexte du changement climatique en fonction des pratiques de gestion de la neige, avec uniquement du damage (a et c) et une couverture de 30 % du domaine skiable par des installations de production de neige (b, d, e).

(Source : Application aux Pyrénées de la méthode décrite et appliquée pour les Alpes françaises dans Spandre et al., 2019b)

La **figure 9.6** montre l'évolution temporelle de l'indicateur d'enneigement des stations de sport d'hiver des Pyrénées françaises de 1960 à 2100, utilisant des projections climatiques ajustées et un modèle de manteau neigeux tenant compte des processus de neige naturelle damée (**9.6a**), mais aussi de l'effet de la production de neige (**9.6b**). Les projections des divers scénarios sont similaires dans un premier temps, et divergent peu avant la moitié du XXI^e siècle.

L'impact sur les conditions d'exploitation des domaines skiables est marqué : dans le cas du RCP8.5, la valeur médiane (rencontrée en moyenne une année sur deux) descend rapidement en deçà du Q20 historique alors que cette situation ne se présente qu'après 2040 dans le cas du RCP4.5 et jamais dans le contexte du RCP2.6. **La contribution de la neige de culture pour réduire l'impact du réchauffement apparaît relativement marginale en permettant de reculer de quelques années cette échéance, tout en réduisant l'amplitude de la variabilité interannuelle de l'enneigement.**

Les **figures 9.6c** et **9.6d** présentent la fréquence de récurrence des saisons les plus défavorables connues pendant la période de référence historique 1986-2015. En écho à la diminution rapide de l'indice de fiabilité, le taux de retour des saisons de faible enneigement connaît dans les projections une croissance importante dès 2030 jusqu'à atteindre une valeur de 100 % dès 2080 dans le cas du RCP8.5. Dans le cas du RCP4.5, la pire situation connue, une année sur 5 deviendrait donc la norme une année sur 2 à l'horizon 2050 alors qu'au même moment cette fréquence de retour se stabiliserait autour d'une saison toutes les 2 à 3 dans le contexte du RCP2.6. La **figure 9.7** fournit une représentation spatiale du taux de retour de l'enneigement au 20 % d'années les plus défavorables (Q20).

Le massif pyrénéen est ainsi subdivisé en massifs météorologiques qui constituent l'unité de base des simulations d'enneigement. Quel que soit le massif considéré, il apparaît ainsi que la production de neige a un impact sensible mais limité sur la période historique qui tend à se prolonger à l'échéance 2050, particulièrement pour les massifs les plus orientaux. Cette situation s'explique très certainement par l'altitude relativement élevée des stations bien que demeurant de taille modeste (**figure 9.5**). En revanche, toute différence, quel que soit le massif, quel que soit le type de gestion de neige considéré, disparaît en fin de siècle dans le cas du RCP8.5, alors que la situation dans la trajectoire du RCP2.6 apparaît comme beaucoup plus contrastée.

L'évolution du besoin en eau pour la production de neige est présentée dans la **figure 9.6e**. Elle montre que **malgré la dégradation des conditions d'enneigement naturel au cours du XXI^e siècle, le besoin en eau pour la production de neige n'augmente pas, quand bien même les conditions naturelles d'enneigement se dégradent, ce qui indique l'absence de marges de manœuvre en la matière.**

Ce résultat est valable à l'échelle de l'ensemble des Pyrénées, avec des situations potentiellement contrastées à l'échelle de chaque station, et pour un taux de couverture donné en équipements de production. Cette évolution est principalement due à l'accroissement de la température et à la diminution des créneaux de production qui en résulte. Dans les scénarios de fort réchauffement (RCP8.5), le besoin en eau calculé pour la production de neige se réduit fortement au cours du XXI^e siècle, du fait de conditions de production de plus en plus défavorables.

Le climat s'affirme comme un facteur décisif pour l'évolution des conditions d'enneigement des stations pyrénéennes qui apparaissent d'ores et déjà soumises à une contrainte forte. La stabilisation, dans le meilleur des cas, de la capacité de production de neige dans un contexte qui continue de se dégrader montre que les stations semblent se rapprocher rapidement d'un point d'inflexion des conditions d'exploitation. Dans ce sens, nous rejoignons les conclusions de **Viès (2019)** qui montre, qu'en plus du changement climatique, de multiples facteurs (impact environnemental, appauvrissement des ressources territoriales délaissées par le tourisme du ski, évolution de la demande) perturbent les trajectoires des stations, au point de remettre leur existence en cause.

Ces résultats mettent en lumière l'irréversibilité des trajectoires climatiques jusqu'à la moitié du XXI^e siècle du fait de l'inertie climatique et des émissions de GES, et les marges de manœuvre limitées en matière d'adaptation sous l'angle de la fiabilisation de l'enneigement, même si l'enneigement naturel et/ou géré n'aura pas totalement disparu à cette échéance. L'impact des émissions de GES, déterminant pour la deuxième moitié du XXI^e siècle, souligne l'articulation indispensable entre adaptation et réduction de ces émissions pour toutes les activités humaines, et invite à considérer les transitions territoriales et touristiques à l'aune de ces deux pans de l'action climatique.



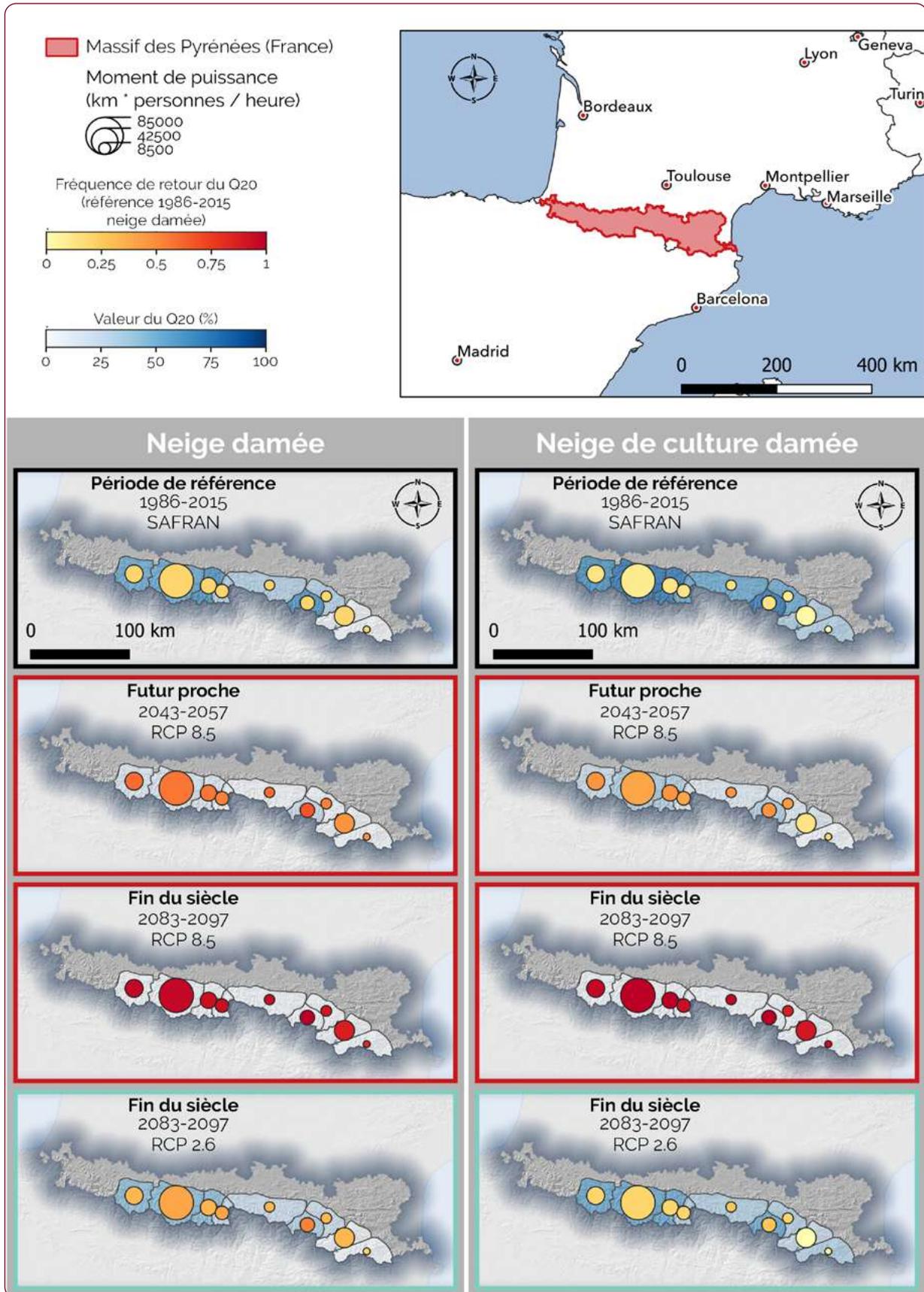


Figure 9.7. Carte des stations des Pyrénées françaises réparties en fonction des massifs à l'échelle desquels la modélisation du manteau neigeux est réalisée.

Répartition du moment de puissance (produit du dénivelé et du débit des remontées mécaniques, cet indicateur permet d'évaluer et de comparer la contribution d'un appareil au sein d'un parc de remontées mécaniques ou les stations en fonction de la taille totale de leurs équipements) et fréquence de retour des années de faible enneigement de la période de référence (quantile 20 % de l'enneigement en neige damée).

(Source : Application aux Pyrénées de la méthode décrite et appliquée pour les Alpes françaises dans Spandre et al., 2019b)

Les usages énergétiques des bâtiments : deuxième émetteur de gaz à effet de serre en stations de montagne

Solène ALBERT (UPVD - CRESEM)

En 2007, dans le cadre de l'élaboration de la Charte nationale du développement durable, 10 stations de ski (adhérentes à l'association nationale des maires des stations de montagnes, ANMSM) ont réalisé un Bilan carbone de leurs activités, avec l'aide de l'ADEME et de l'association Mountain Riders (ANMSM, 2007). Il en ressort notamment qu'avec 27 % des émissions de gaz à effet de serre (GES), les usages énergétiques des bâtiments représentent le deuxième poste de dépenses d'émissions de GES en stations de montagne, après le transport de personnes (57 %). Les usages énergétiques des bâtiments sont répartis entre 16 % pour les activités tertiaires et 11 % pour l'habitat résidentiel. Les activités tertiaires concernent les hébergements touristiques (hôtellerie, résidences hôtelières, locations), la restauration ou encore l'organisation d'activités de loisirs (patinoires, piscines, remise en forme, cinéma, etc.).

L'activité touristique saisonnière en stations de montagne inclut des périodes d'occupation très fortement concentrées, principalement en hiver, qui nécessitent la mobilisation d'installations thermiques pour répondre aux pics de consommation. Les résidences secondaires en sont une parfaite illustration. Occupées moins de 4 semaines par an, et principalement en hiver, elles représentent entre 50 % et 75 % des lits touristiques en stations de montagne. S'ajoute à ces résidences secondaires le poids significatif des résidences en stations ayant plus de 30 ans. Utilisant majoritairement des énergies fossiles comme combustible de chauffage, ces dernières représentent environ 45 % des émissions de GES du secteur résidentiel.

Bon nombre de ces bâtiments et hébergements touristiques ne répondent plus aux normes et exigences actuelles, notamment en termes d'efficacité énergétique. Leur réhabilitation a d'ailleurs fait l'objet de la création d'un dispositif ad hoc suite à la Loi SRU de 2000 (relative à la solidarité et au renouvellement urbains). Ces opérations de réhabilitation de l'immobilier de loisir (ORIL) ont notamment pour objectif d'améliorer le parc immobilier touristique et locatif. Malgré une redéfinition de l'outil

avec la loi du 28 décembre 2016 (« acte II de la loi Montagne »), ce dispositif ne semble pas, à ce jour, présenter de résultats probants. En 2010, la loi portant engagement national pour l'environnement (ENE) a été créée, fixant comme objectif l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments.

Quelques années plus tard, la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (loi TECV de 2015) engage la France dans la lutte contre le dérèglement climatique, notamment en renforçant son indépendance énergétique. En 2018, une expérimentation sur la réhabilitation de l'immobilier de loisir et la transition énergétique des stations a été lancée par le Gouvernement et confiée à Atout France. 10 stations de montagne ont fait partie du programme expérimental, dont 2 situées en Occitanie : Saint-Lary-Soulan et Ax-les-Thermes (Atout France, 2015 et 2020).

Bien que les résultats de cette expérimentation nécessitent un recul de plusieurs années et que les solutions qui seront mises en place sont propres à chaque station, plusieurs grands objectifs ont pu d'ores et déjà être définis : mieux observer et piloter la destination, mobiliser et sensibiliser les acteurs locaux (notamment les propriétaires), ou encore mettre à disposition des outils d'accompagnement (financiers, humains, etc.) liés aux opérations de rénovations. Une autre station d'Occitanie s'est engagée vers la recherche de diminution de ses dépenses énergétiques, à savoir la station de Peyragudes.

En 2015, elle fut la première station française à recevoir la certification ISO 50001 sur l'exploitation, la maintenance des remontées mécaniques, le parc roulant, le damage, la neige de culture, mais également les bâtiments. Cette norme volontaire propose des modalités visant la réduction de consommation d'énergie. A travers la mesure de ses consommations et la recherche de solutions adaptées, la station a diminué sa dépense énergétique par jour d'exploitation de 5,2 %, ce qui représente la consommation annuelle moyenne de 115 foyers (Bachimon et al., 2016 ; Hatt, 2019).



CHAPITRE

10

**MOBILITÉ
ET ÉNERGIE**

Coordination Mobilité : Bruno REVELLI

Rédaction partie Mobilité : Guillaume CARROUET, Maxime HURÉ, Robin PUCHACZEWSKI, Bruno REVELLI.

Coordination Énergie : Julie FABRE, Virginie HUGUES et Guillaume SIMONET

Rédaction partie Énergie : Edi ASSOUMOU, Robin BÉGHIN-TANNEAU, Frédéric GUÉRIN, Maritxu GUIRESSE, Didier KLEIBER, Camille PARROD, Éric SAUQUET, Javier SCHEINER, Gildas SIGGINI, Clémence SOUID-PONCELIN, Pierre STROSSER, Jean-Philippe VIDAL.

PARTIE MOBILITÉ

Report modal : une action en faveur du climat

Bruno REVELLI (UT2J – LISST)

Quand on cherche à évaluer le bilan carbone des différents modes de transport, il est important de distinguer les volumes totaux d'émissions de gaz à effet de serre (GES) mais aussi de ramener ces volumes au nombre de kilomètres parcourus par passagers. En termes de volume, le transport routier arrive largement en tête (95 %) reléguant les autres modes à une part marginale. Précisons que parmi ces transports routiers, les voitures (56 % du total des émissions), représentent plus du double des émissions des poids-lourds (22 %).

Ces chiffres peuvent alors laisser penser que le secteur aérien a une empreinte carbone négligeable avec seulement 0,8 % des émissions nationales. Ce serait oublier que ne sont pris en compte que les vols intérieurs mais aussi que le transport aérien surpasse très largement les autres secteurs quand on rapporte ses émissions au nombre de kilomètres parcourus par passagers transportés : 144g de CO₂. C'est près du double des 85g de la voiture particulière et 45 fois plus qu'un TGV ! C'est donc bien depuis l'aérien et le routier que le report modal doit s'effectuer vers des modes moins émetteurs.

Aussi, **l'importance des navettes aériennes entre Toulouse et Paris contribue à détériorer le bilan des 2107 kg de CO₂ rejetés par an en moyenne par un habitant de l'Occitanie dans le secteur des transports.** Ce chiffre situe la région légèrement au-dessus de la moyenne nationale pour les émissions de GES par habitants dans ce secteur (HCC, 2020). Le report modal apparaît d'autant plus prioritaire que les transports constituent, selon l'ADEME, le 1er secteur d'émission de CO₂ (30 % du total national) loin devant le chauffage (17 %) et l'industrie (11 %).

Plus préoccupant encore, le transport est le seul secteur dont les émissions augmentent de manière régulière : +11 % depuis 1990 (CITEPA, 2019). On est donc très loin des objectifs de la loi Grenelle de 2010 qui fixait une division par quatre des émissions de GES en 2050 ou de la COP21 qui, pour les secteurs des transports, a fixé l'objectif de 29 % de réduction en 2028. La révision de la stratégie nationale bas carbone a même conduit à faire de la neutralité carbone l'objectif de 2050. A ces effets d'annonce toujours plus ambitieux répondent pourtant des résultats chaque année en deçà des objectifs fixés.

La moitié du dépassement est ainsi liée au secteur des transports du fait de la croissance des déplacements et du boom des voitures utilitaires sport (SUV).

Ainsi, depuis 2016, les émissions de CO₂ moyennes des véhicules neufs sont reparties à la hausse. Jean-Baptiste Frétegnon explique ce constat d'échec par le fait que cette réduction des GES reste un objectif secondaire des politiques publiques de mobilité, par un déficit d'autonomie dans l'expertise et par une hiérarchisation inversée des registres de décarbonation (Frétegnon et al., 2020). En effet, parmi les cinq leviers identifiés par Aurélien Bigo pour faire baisser les émissions de CO₂ dans le secteur des transports, c'est la solution technologique qui est privilégiée alors qu'elle est la moins efficace et la plus incertaine (Bigo, 2020). Agir sur la demande et favoriser le report modal apparaissent comme les deux leviers les plus efficaces.

Il existe pourtant un moyen efficace d'activer ces deux leviers simultanément : améliorer la cohérence urbanisme – transport, c'est à dire **penser un urbanisme plus dense susceptible de favoriser les transports en commun tout en réduisant les distances parcourues grâce à des quartiers multifonctionnels.** Juliette Maulat a étudié ces politiques à l'échelle de l'agglomération toulousaine. Si des efforts ont été faits à travers la réalisation du SCOT, elle montre que les principes de ces schémas sont parfois détournés lors de leur mise en œuvre et souligne divers dysfonctionnements liés notamment à la gouvernance problématique de ces politiques, aussi bien entre les acteurs de l'urbanisme et des transports, qu'entre les différents échelons responsables de ces politiques : Région, Métropole, Communes (Maulat, 2016).

Les contrats d'axes illustrent ces difficultés de mise en œuvre de tels principes. Leur objectif est de conditionner une amélioration de l'offre de transports en commun avec une densification de l'urbanisation autour de ces stations. **Leur mise en œuvre, que ce soit au sein de la métropole toulousaine ou le long de l'axe Nîmes – Alès, est souvent contrariée par le manque de coordination entre les différents acteurs (Maulat, 2015).**



Le train de nuit de nouveau sur les rails

Guillaume CARROUET (UPVD – ArtDev)

Longtemps considéré comme un service par défaut par rapport à la grande vitesse sur les moyennes et longues distances (Zembri, 2017), le TET de nuit (Train d'Equilibre du Territoire) ou Intercité de nuit pour la marque commerciale de la SNCF, est remis au goût du jour. A l'image de son proche-parent le TET de jour, il a pourtant subi une lente décroissance à l'échelle nationale, le service étant réduit à un minimum de deux lignes en activité jusqu'à la fin de l'année 2019 (figure 10.1). A cette date, seules les lignes Paris-Briançon et Paris-Rodez/Toulouse/Latour-de-Carol/Cerbère-Portbou ont été maintenues suite à une décision de l'Etat. Il est vrai que les chiffres de fréquentation soulignent le faible dynamisme de cette offre. Par exemple, le taux d'occupation est passé de 47 % en 2015 à 36 % en 2018 (ART, 2018).

Les facteurs explicatifs de cette désaffection sont à chercher dans un faisceau de causes. La concurrence est rude sur le segment des mobilités de moyenne et longue distance avec la présence des autocars, de l'aérien, du covoiturage, voire même du train lui-même, dont le TGV. Le déficit est une autre explication puisque le train de nuit représente 25 % du déficit de l'ensemble des lignes TET en 2014, pour seulement 1,2 million de voyages de nuit sur 33,9 millions de voyages en TET (Duron, 2015). L'Etat n'est pas exempté de tout reproche si l'on pointe le manque d'investissement dans le réseau ferré national. Les travaux, souvent nocturnes, ont pénalisé les circulations. S'ajoute l'absence d'investissement dans le matériel roulant dont la moyenne d'âge avoisine les 40 ans.

La situation n'est pourtant pas irréversible. **A la faveur de quelques faits décisifs, ce service est remis au goût de jour et devient même une solution de report modal face à l'aérien.** Le train de nuit est présenté comme une alternative viable du point de vue écologique sur les parcours de longue distance avec respectivement 14 et 8,5 fois moins de CO₂ émis par rapport aux vols intérieurs en avion et aux autocars (ADEME, 2018). Ce regain, dirait-on béguin au regard de la couverture médiatique du sujet, se traduit dans le plan de relance de l'Etat à hauteur de 100 millions d'euros consacrés à la cause (modernisation des wagons-lits en particulier). La décision récente du gouvernement d'interdire les vols intérieurs ayant une alternative en train inférieure à 2h30 place d'autant plus le train de nuit comme solution de report modal.

Pour une alternative crédible, il faudra sans doute un projet ambitieux en termes de desserte du territoire national. Sans avoir de certitude à ce jour sur cette relance effective du service de nuit, deux facteurs supplémentaires plaident pour sa cause. La success story de l'opérateur ferroviaire autrichien ÖBB qui déploie un réseau de nuit

sur une partie de l'Europe est un facteur d'inspiration non négligeable. L'entreprise devrait d'ailleurs proposer une ligne Genève-Barcelone, avec desserte de Lyon, Avignon et Perpignan d'ici 2024. Plus encore, le rapport additionnel à la LOM (Loi d'Orientation des Mobilités) paru au printemps 2021, plaide pour une relance significative du réseau de nuit avec la création d'une armature desservant la majeure partie du territoire français.

La région Occitanie est particulièrement concernée par le sujet du train de nuit. **Le caractère périphérique de la région peut être atténué en partie par cette densité actuelle ou projetée de l'offre de train de nuit** (Carrouet, 2018). Le Conseil régional s'est en effet prononcé très tôt pour le maintien de la branche Toulouse-Cerbère/Portbou face à un désengagement de l'Etat, en reprenant la moitié du déficit de la ligne. Les perspectives de relance du train de nuit témoignent également de l'importance de cette offre. Le Ministre Jean-Baptiste Djebbari, dans la lignée de la réouverture du segment Paris-Nice, a annoncé l'ouverture de la ligne Paris-Tarbes d'ici la fin de l'année 2021. En définitive, dans l'attente des futures LGV Bordeaux-Toulouse et Montpellier-Perpignan, aux délais de réalisation incertains, le train de nuit semble être un levier favorable au report modal.

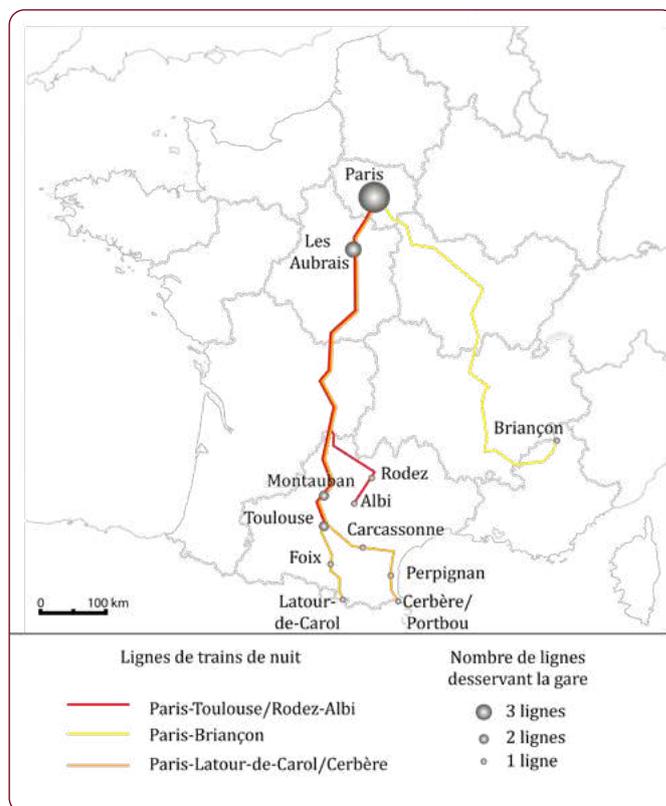


Figure 10.1. La desserte par les trains de nuit fin 2019. (Source : www.ouisncf.fr. Fond : GEOFLA ; réalisation : Carrouet, 2018)

Étendre le domaine du vélo pour lutter contre le changement climatique

Robin PUCHACZEWSKI (UT2J – LISST)

Quelles conditions pour répondre aux enjeux climatiques ?

On le sait, le vélo est le mode mécanisé le moins émissif de gaz à effet de serre (GES) en analyse de cycle de vie, et s'il est légèrement plus polluant que la marche, il permet également de couvrir un périmètre beaucoup plus large et donc de répondre à des besoins auxquels elle ne répond pas. En cela, il peut être un instrument majeur de réduction de GES, mais également de résilience (Brand et al., 2021). Pour cela, il ne suffit pas d'augmenter le nombre de déplacements à vélo, encore faut-il qu'ils remplacent des déplacements motorisés.

À l'heure actuelle, ce n'est que très peu le cas : d'abord, très peu de Français utilisent le vélo au quotidien (ils sont 5 % en 2019, contre 43 % aux Pays-Bas) et ensuite, la majorité des déplacements à vélo sont très courts (au niveau national, le vélo représente 2,7 % des trajets mais seulement 0,6 % des distances parcourues au quotidien).

Aurélien Bigo (2021) estime que le développement du vélo peut constituer jusqu'à 6 % des besoins de baisses d'émissions dans la mobilité pour 2050. Cela implique de multiplier le nombre de kilomètres parcourus par 10, et donc, d'une part, de permettre à beaucoup plus de monde de choisir ce mode, et, d'autre part, de rendre le vélo pertinent sur des distances plus longues.

Si la part du vélo en Occitanie ne représente que 2 % des déplacements, ce chiffre souligne également l'existence d'une marge de progression importante. Des enquêtes menées auprès des salariés du secteur aéroportuaire de Toulouse ont ainsi montré que 40 % d'entre eux souhaitent changer de mode de transport pour se rendre au travail et que 26 % privilégieraient le vélo (Dugot et Revelli, 2021). Par ailleurs, des recherches sont en cours afin de mesurer l'impact de la pandémie sur l'usage des vélos en libre-service à Toulouse et Lyon.

Un cas concret : le projet de Réseau Express Vélo toulousain

Un Réseau Express Vélo (REV) a pour fonction d'être le réseau cyclable structurant d'un territoire et d'assurer des liaisons confortables et efficaces entre les pôles (Tortel et Jouannot, 2016). C'est un réseau maillé, franchissant les coupures urbaines et permettant des déplacements de longue distance. Par rapport à des aménagements cyclables ordinaires, il présente une continuité, un confort, une sécurité et une visibilité accrues. Le respect de ces principes amène à la création d'un aménagement de type REV, c'est-à-dire une piste cyclable large (3-4 mètres minimum), séparée des flux motorisés et piétons, jalonnée et qualitative. Ce concept, originaire d'Europe du Nord, a été adopté par plusieurs agglomérations françaises (Grenoble, Strasbourg, Paris...) depuis 2010 (Puchaczewski et al., 2019).

Le projet de REV Toulousain a été élaboré dans le cadre du Schéma Directeur Cyclable d'Agglomération par les collectivités compétentes de l'agglomération toulousaine sous la coordination de Tisséo Collectivités (Tisseo, 2019). Il part du constat que les politiques cyclables développées jusqu'alors n'ont eu qu'un effet limité sur la pratique du vélo. **La discontinuité des réseaux fait du vélo un mode perçu comme plus dangereux, et le rend moins pertinent sur les longues distances pratiquées aujourd'hui dans l'agglomération.** La planification d'axes cyclables sécurisés sur de plus longues distances est donc apparue nécessaire pour convaincre de nouveaux usagers, et faciliter les déplacements des cyclistes existants en leur permettant de parcourir de plus grandes distances. Adopté en 2019, le projet est désormais entre les mains de Toulouse Métropole et du conseil départemental de la Haute-Garonne, qui ont en charge sa réalisation (figure 10.2 et 10.3).

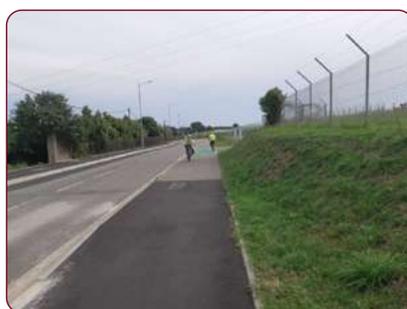
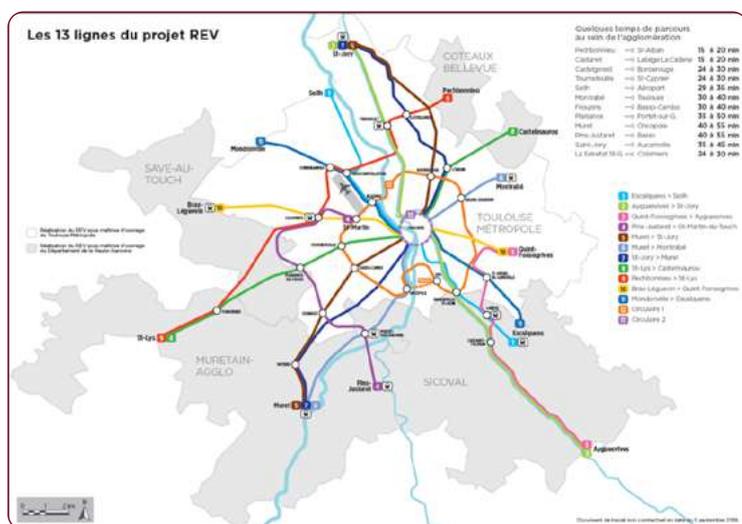


Figure 10.3. Les pistes cyclables entourant l'aéroport (ici rue Velasquez à Blagnac) préfigurent le futur REV. (Source : R. Puchaczewski)

Figure 10.2. Carte promotionnelle du REV parue en juillet 2019. (Source : Tisséo Collectivités, 2019).

La dimension écologique de la gratuité des transports

Maxime HURÉ (UPVD - CDED)

Depuis les mesures pionnières prises par la municipalité de Colomiers en 1971, de nombreuses villes françaises ont généralisé le principe de gratuité sur leur réseau de transports. Alors que l'intégration de Colomiers au sein du périmètre des transports de Tisséo a mis fin à cette expérience en 2016, **l'Occitanie compte aujourd'hui 4 des 35 réseaux gratuits du pays : Figeac (depuis 2003), Castres (2008), Gaillac-Graulhet (2014) et Cahors (2019).**

Si l'argument écologique n'était pas toujours mis en avant dans les premières expériences, il est désormais systématiquement avancé pour promouvoir cette politique (Guelton et Poinot, 2020). Pour caractériser la dimension écologique de la gratuité, il convient de s'intéresser, dans un premier temps, à l'une des spécificités de cette mesure : le choix d'une incitation tarifaire et symbolique pour stimuler la demande en faveur du transport collectif. Mais cette analyse ne suffit pas. Il s'agit aussi d'analyser les politiques urbaines dans lesquelles s'insère un réseau de transport gratuit, en particulier celles visant à encadrer les déplacements automobiles.

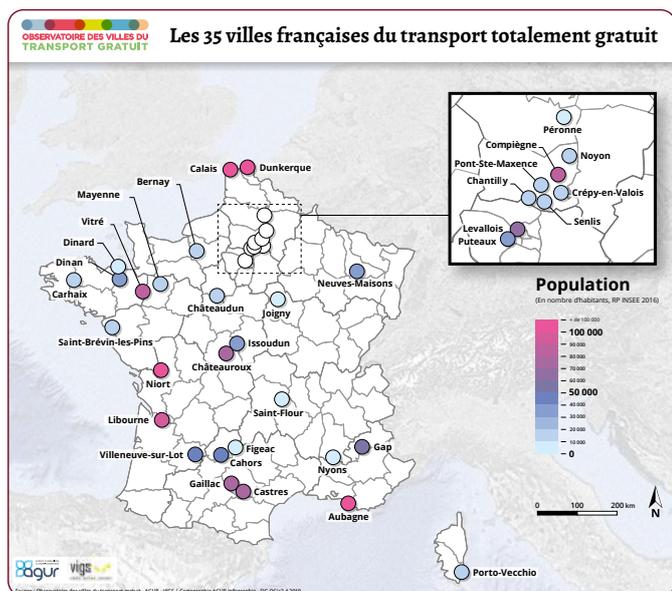


Figure 10.4. Carte des villes françaises du transport gratuit.

(Source : Observatoire des villes du transport gratuit, 2021)

L'incitation tarifaire de la gratuité engendre-t-elle un transfert des automobilistes vers les transports collectifs ? La question des effets réels de la gratuité des transports sur le trafic automobile est peu documentée et les modes de calcul utilisés pour essayer de quantifier ces effets soulèvent de nombreuses controverses (Transports urbains, 2020). C'est pourquoi les opérateurs et les élus s'appuient d'abord sur les chiffres de la fréquentation du réseau, à la fois pour établir des objectifs dans les politiques publiques et pour évaluer les mesures mises en œuvre.

Sur la base des chiffres de la fréquentation des transports, la gratuité est présentée comme une réussite. A Dunkerque, la fréquentation du réseau a en effet augmenté de 85 % la semaine et de 120 % les week-ends entre septembre 2017 et septembre 2019 (Huré et Javary, 2019). **Ces bons chiffres s'observent également dans les autres réseaux ayant fait le choix de la gratuité : à Castres, la hausse a été de 76 % sur les six premiers mois.**

Ces chiffres offrent une photographie intéressante de l'augmentation de la fréquentation, mais ils manquent de contextualisation et ne permettent pas toujours d'isoler l'effet de la gratuité des transports dans les réseaux ayant restructuré leur offre. Si ces comparaisons permettent de fournir a posteriori des argumentaires en faveur de la gratuité des transports, les chiffres de la fréquentation ne permettent pas de conclure quant aux bénéfices écologiques de la gratuité car l'effet sur le trafic automobile reste méconnu. L'augmentation de la fréquentation n'induit pas nécessairement une diminution forte du trafic automobile, même si dans une première enquête menée à Dunkerque en 2019, 24 % des usagers ont affirmé avoir remplacé leur trajet auparavant réalisé en voiture par le bus (Huré et Javary, 2019). Par ailleurs, l'augmentation de la fréquentation générée par le passage à la gratuité peut entraîner un autre bénéfice écologique : une optimisation réelle d'une infrastructure coûteuse en énergie.

Pour caractériser la dimension écologique de la gratuité, il semble nécessaire d'interroger plus largement la capacité des projets de gratuité des transports à transformer l'urbanisme. Les projets urbains dans lesquels s'insèrent les politiques de gratuité des transports permettent-ils de diminuer la place de l'automobile en ville ? Pour répondre à cette question, il est possible d'ouvrir une réflexion plus large sur la production de la ville, en s'intéressant à la place de la voiture individuelle dans les politiques urbaines. Une attention particulière peut être portée à la politique de stationnement automobile, dans la mesure où cette dernière semble la plus efficace pour réguler la circulation automobile dans les villes (Massot, 2002). Une autre manière d'interroger la dimension écologique de la gratuité des transports consiste à retourner la question : dans quelle mesure permet-elle d'éviter d'autres comportements de mobilité moins vertueux ?

L'Observatoire des villes du transport gratuit travaille par exemple sur la manière dont la gratuité pourrait impacter la mobilité des jeunes, en particulier la temporalité du passage du permis de conduire ou de l'achat d'un véhicule, mais aussi l'apprentissage à de nouvelles pratiques de déplacement en transport collectif (figures 10.4, 10.5 et 10.6).

Ville	Évolution de la fréquentation
Aubagne <i>(depuis le 15 mai 2009)</i>	Objectif de +58% la 1 ^{ère} année : + 100% des voyages (2009-2011) 2009 : 18 voy/hab/an 2011 : 44 voy/hab/an + 155% (2008-2012)
Châteauroux <i>(depuis le 2 décembre 2001)</i>	2001 : 20 voy/hab/an 2010 : 61 voy/hab/an Objectif de +25% la 1 ^{ère} année + 55 % les six premiers mois +208% de voyages (2001-2011)
Castres <i>(depuis le 1^{er} octobre 2008)</i>	+76% les six premiers mois (notamment chez les scolaires et les actifs)
Libourne <i>(depuis le 28 août 2010)</i>	Objectif : passer de 350 000 à 400 000 voyages dès la première année 350 000 → 700 000 soit +200% (2010-2015)
Compiègne <i>(depuis le 19 septembre 1975)</i>	26 voy/hab/an → 31 voy/hab/an (1978-2002) +150% de voyages les 8 1ers mois mais que +4% fin 1976 +51% avec la nouvelle offre dans les années 2000
Vitré <i>(depuis mai 2001)</i>	47 500 voyages → 315 000 voyages (x7) (2000-2009)
Bologne (Italie) <i>(1973-1977)</i>	+ 15% en 1973 → +19% en 1974 → +16% en 1975 mais que + 3,2% en 1976 et + 0,24% en 1977
Hasselt (Belgique) <i>(1^{er} juillet 1997-2013)</i>	330 000 → 3,7M de voyages, soit x11 (1997-2003) et x14 (2013) 1 000 → 12 600 passagers/jour (1997-2007)
Tallinn (Estonie) <i>(depuis le 1^{er} janvier 2013)</i>	+14% (2013-2016)



Figure 10.6. Évolution de la fréquentation de certains réseaux de transport collectif des villes passées à la gratuité en France et en Europe.
(Source : tableau réalisé par Henri Briche, 2017)

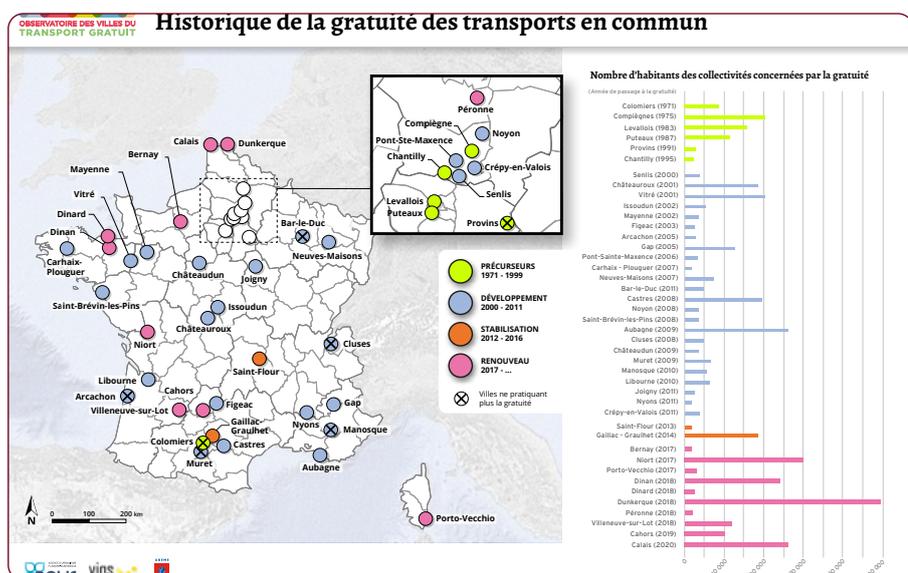


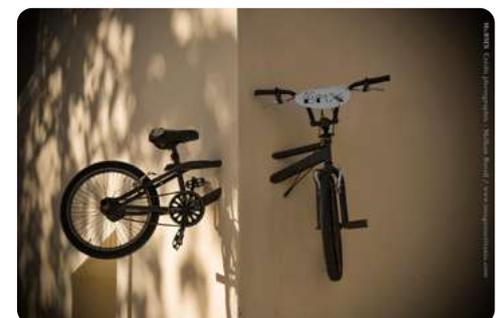
Figure 10.5. Carte des villes françaises du transport gratuit.
(Source : Observatoire des villes du transport gratuit, 2021)



Figure 10.7. L'accessibilité des stations balnéaires languedociennes aux modes alternatifs à la voiture.
(Source : Revelli, 2021)



Figure 10.8. Le Train Jaune en gare de Mont-Louis.
(Source : Revelli, 2019)



Réduire l’empreinte environnementale des déplacements touristiques en Occitanie

Bruno REVELLI (UT2J – LISST)

Pour une très large majorité de Français, les vacances riment avec pompe à essence. En effet, la part des déplacements motorisés (voiture, véhicule utilitaire, deux-roues et camping-car) dans la sphère des déplacements touristiques est écrasante et en croissance : à l’échelle nationale elle s’élève à 82,5 % contre 13,5 % pour le train selon l’enquête Suivi de la Demande Touristique de 2016 (MERF, 2017). **En Occitanie, l’enquête du Comité Régional au Tourisme (CRT) de 2020 présente des résultats encore plus accentués** avec 87 % des sondés qui déclarent utiliser ces modes de déplacements, en particulier l’été et pour les destinations telles que la montagne et le littoral. Une fois sur place, les modes motorisés individuels restent majoritaires (89 % en Occitanie) (CRTO, 2020). Ces résultats soulignent l’ampleur des marges de manœuvre existantes concernant le report modal en lien avec les pratiques touristiques.

Les citoyens soucieux de leurs déplacements au quotidien oublieraient-ils leurs bonnes pratiques une fois revêtus leurs shorts et sandales ? Si la question reste débattue, un nombre important d’études souligne une déconnexion notable entre les mobilités quotidiennes et celles liées aux pratiques de tourisme et de loisirs (Durif et al., 2017). Des recherches menées dans les métropoles suisses confirment que les personnes qui utilisent pourtant peu leur voiture dans leurs déplacements quotidiens y ont massivement recours dès qu’il s’agit d’activités de loisir ou touristiques (Munafò, 2016). On peut alors se demander s’il s’agit-là d’une envie de liberté et de souplesse propre à ce type de déplacements ou plutôt d’une adaptation par défaut du fait de la faiblesse des offres alternatives.

Force est de constater qu’en Occitanie comme ailleurs, le recours à des transports alternatifs n’est pas sans présenter son lot de contraintes, aussi bien en termes d’horaires, de couverture du territoire que de régularité de l’offre. Malgré ces difficultés, une autre enquête du CRT Occitanie montre une équivalence chez les jeunes entre le désir de partir en voiture (62 %) ou en train (60 %). Une autre enquête du CRT identifie les transports comme « le maillon faible du tourisme durable » et souligne que seulement 52 % des prestataires touristiques se déclarent en mesure d’accueillir des clients sans voiture. Les acteurs du tourisme sont par ailleurs 77 % à considérer que les informations fournies par les sites des acteurs institutionnels sont insuffisantes concernant les transports collectifs à destination.

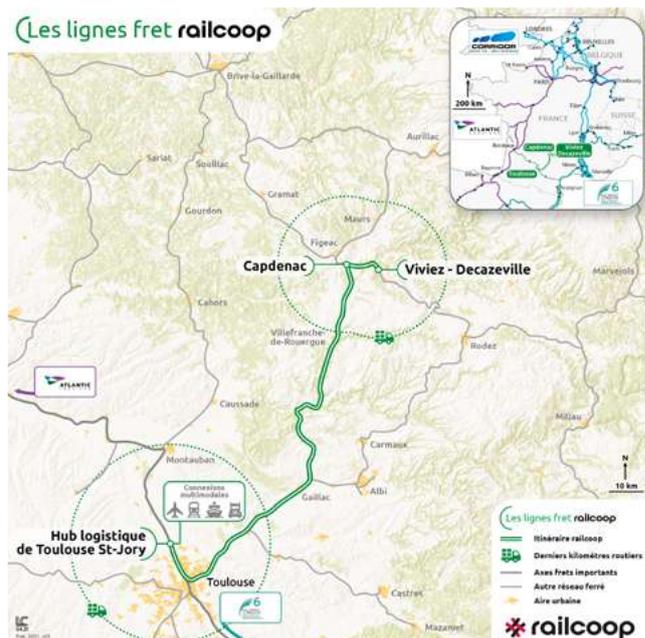
Précisons que la région dispose sur son littoral méditerranéen de 11 plages accessibles en moins de 12 mn de vélo depuis une gare dont 4 sont accessibles en moins de 10 mn à pied (figure 10.7). Pour les stations de ski, on ne compte guère qu’Ax-les-Thermes et Porté-Puymorens qui disposent actuellement d’une bonne desserte ferroviaire en attendant la réouverture de la ligne de Bagnères-de-Luchon. Ces destinations ferroviaires sont actuellement valorisées par les offres promotionnelles « Skirail » ou « Train des plages » mais ces dernières attirent majoritairement un public jeune et captif. De plus, il n’existe pas d’équivalents pour des sites pourtant facilement accessibles depuis des gares régionales comme la cité de Carcassonne, Najac ou Lourdes. **Un report modal significatif susceptible de toucher une plus grande diversité de profils touristiques nécessite certainement des efforts de sensibilisation aux enjeux du changement climatique** dans les pratiques touristiques, aussi bien auprès des touristes que des acteurs du secteur (figure 10.8).

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Une gouvernance participative pour développer le ferroviaire dans les territoires - région

Railcoop - [En savoir plus](#)

L’innovation de Railcoop réside dans l’idée que la réponse à la transition écologique n’est pas technologique, mais organisationnelle : il faut rendre accessible les technologies décarbonées existantes comme le ferroviaire. Le ferroviaire a non seulement un impact sur les émissions de gaz à effet de serre, mais également sur l’aménagement du territoire. En connectant les territoires, la possibilité est offerte d’aller vers une dé-métropolisation et donc vers un aménagement du territoire plus résilient. C’est pour cela que Railcoop souhaite proposer davantage de liaisons ferroviaires, pour transporter des voyageurs comme des marchandises. Le faire ensemble est une valeur cardinale du projet. Railcoop s’est donc constituée en société coopérative d’intérêt collectif. Comme 1 sociétaire = 1 voix en Assemblée Générale, tout le monde a son mot à dire et participe au projet. Les sociétaires de Railcoop participent aux travaux de la coopérative en rejoignant des cercles de réflexion (identification de futures lignes, réflexion sur la gouvernance, etc.).



PARTIE ÉNERGIE

La méthanisation : une technologie productrice d'énergie renouvelable et d'amendement organique

Robin BÉGHIN-TANNEAU (INP Purpan - PPGV), F. GUÉRIN (UPS - GET), M. GUIRESSE (U. Toulouse - EFE), D. KLEIBER (INP Purpan), J.D SCHEINER (INP Purpan - EFE)

La gestion du cycle du carbone organique (Corg) est un levier majeur pour le maintien ou l'amélioration de la fertilité des sols agricoles. La gestion de la quantité et de la qualité du Corg dans les sols agricoles permet par exemple d'améliorer directement leur structure ou indirectement via la stimulation de la macrofaune (vers de terre, myriapodes, cloportes, etc.), de stimuler l'activité microbienne et ainsi faciliter la libération de nutriments sous des formes biodisponibles pour les plantes, d'augmenter leur rétention en eau, d'augmenter leur capacité à adsorber des nutriments, etc.

Les apports d'amendements organiques visent précisément à augmenter la quantité de Corg dans les sols agricoles afin d'en améliorer les propriétés physiques, chimiques et biologiques. Au-delà de leurs valeurs agronomiques, les amendements organiques sont désormais associés à des fonctions émergentes telles que 1) la production d'énergie renouvelable grâce, entre autres, à la méthanisation ou 2) à la séquestration de carbone par les sols cultivés (Chenu et al., 2019). La séquestration de carbone par les sols cultivés correspond à un transfert de carbone depuis l'atmosphère vers les sols sur une période significative (supérieure à 20 ans).

En raison de la demande sociétale pour la production d'énergie renouvelable et aux politiques publiques associées, la méthanisation se développe en France et en Europe et pourrait devenir le principal mode de gestion de la biomasse fermentescible (Scarlat et al., 2018). En plus de la production d'énergie renouvelable, la méthanisation conduit à la production d'un résidu couramment appelé « digestat » qui est valorisé agronomiquement (Möller et Müller, 2012).

Nos travaux de recherches consistent à évaluer l'influence de la méthanisation sur le fonctionnement d'un agroécosystème par rapport au scénario initial en l'absence de méthanisation (figure 10.9). Nous nous sommes plus particulièrement intéressés au cycle du carbone organique avec pour principale question : est-ce que l'exportation de carbone lors de la méthanisation via la production du biogaz, puis l'apport du digestat au sol conduit à une diminution de la séquestration de carbone dans les sols cultivés par rapport à un apport de biomasse non digérée ?

Afin de répondre à cette question, nous avons conduit des incubations de sols avec l'ajout d'amendements organiques et tracé le carbone afin de quantifier sa séquestration pour les deux scénarios.

Cette étude a mis en évidence une plus grande séquestration de carbone organique dans les sols pour le scénario méthanisation en raison d'une plus grande stabilité biologique des matières organiques des digestats et d'un ralentissement induit de la biodégradation des matières organiques endogènes des sols (Béghin-Tanneau et al., 2019).

Cette étude souligne le double intérêt de la méthanisation avec la production d'énergie renouvelable et la production d'un digestat ayant une valeur agronomique et environnementale. Le champ d'étude associé à l'influence de l'adoption de la méthanisation sur le fonctionnement des agroécosystèmes à différentes échelles, depuis le sol jusqu'aux territoires en passant par l'exploitation agricole, est large et reste à explorer.



Figure 10.9. Site du campus de Lamothe (EI Purpan), à proximité de Toulouse, sur lequel est installée une installation de microméthanisation. (Source : École d'ingénieurs de Purpan, 2019)

L'émergence des projets d'énergie citoyenne

Clémence SOUID-PONCELIN (Eclr)

L'Occitanie compte plusieurs dizaines de projets d'énergies renouvelables financés et gouvernés par des citoyens et des collectivités. Ces projets dits « citoyens » ont pour but la réappropriation de la transition énergétique par les territoires. Puisque la gouvernance est locale, les décisions se prennent dans l'intérêt du territoire. L'épargne et les recettes enrichissent les collectivités et les habitants sociétaires. Dans ces montages de projet, l'investissement est citoyen et non pas spéculatif : les recettes financent d'autres projets en faveur d'une autonomie énergétique des territoires (rénovation, sensibilisation, production).

En 2021, l'Occitanie compte 26 projets citoyens en fonctionnement et 33 projets en développement. A ceux-là viennent s'ajouter les 19 autres qui sont en phase d'émergence. Les collectifs qui portent ces projets font partie d'un réseau régional, animé par ECLR (Energies Citoyennes Locales et Renouvelables), fortement soutenu par la Région Occitanie et l'ADEME. Les acteurs du réseau échangent très régulièrement (bonnes pratiques, retours d'expériences, rencontres) et partagent le sentiment de faire partie d'un même mouvement (figure 10.10).

En [savoir plus](#).

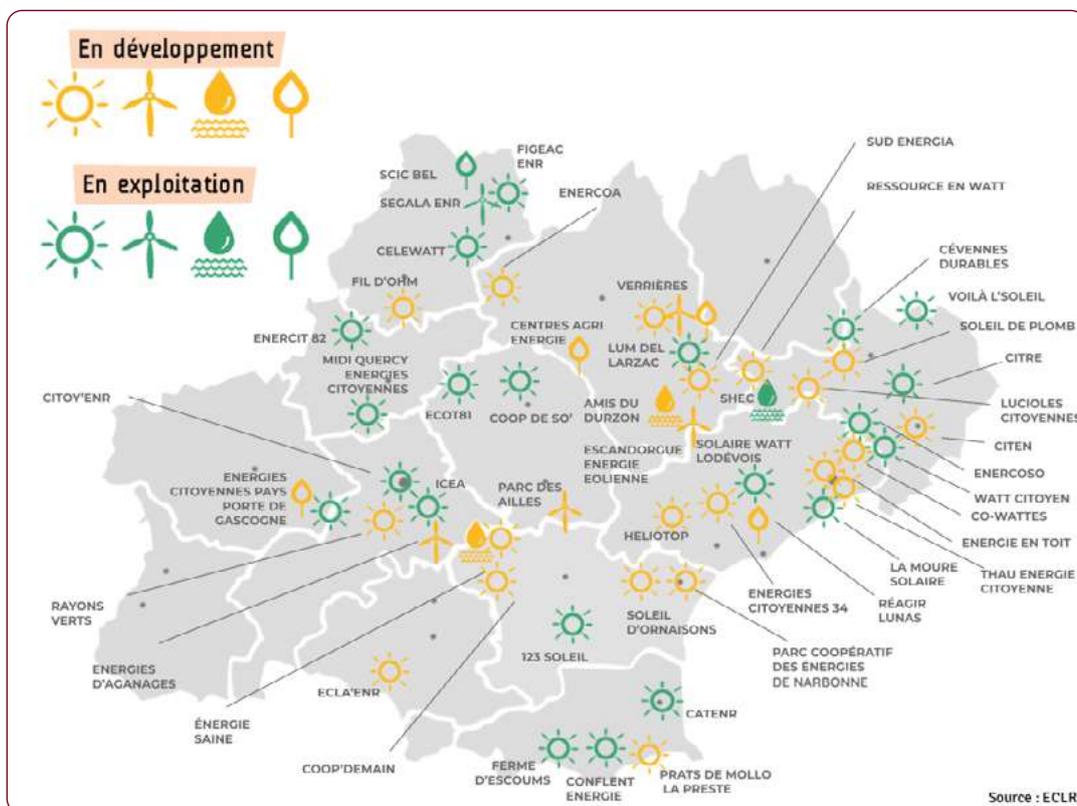


Figure 10.10. Projets d'énergie citoyenne en développement et en exploitation en Occitanie. (Source : ECLR)

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Se réapproprier les choix énergétiques du territoire pour développer les énergies renouvelables - 09

ECLA'EnR - [En savoir plus](#)

En Ariège, un collectif de citoyens et d'élus locaux accompagné par le Parc naturel régional des Pyrénées Ariégeoises s'est constitué en coopérative, la société coopérative d'intérêt collectif (SCIC) ECLA'EnR, afin de produire collectivement et localement des énergies renouvelables. L'objectif est clair : se réapproprier les choix énergétiques du territoire en finançant, développant et exploitant des installations, dans une logique coopérative. Dans une SCIC, chacun participe aux décisions et les bénéfices servent à financer de nouveaux projets. Un premier projet est en développement, pour produire près de 600 000 kWh d'électricité d'origine solaire grâce à l'installation de panneaux photovoltaïques sur plusieurs toitures du territoire. De quoi mettre au vert son épargne en épargnant le climat !



Crédit photo : ECLA'EnR

Un potentiel hydroélectrique mis à mal par le changement climatique

Éric SAUQUET (INRAE - Riverly), Jean-Philippe VIDAL (INRAE - Riverly)

En France, l'hydroélectricité est la seconde source de production d'électricité derrière le nucléaire, soit environ 11 % de la production électrique (p. ex. RTE, 2019). Elle vient compléter la production de base fournie par le parc nucléaire pendant des pics de demande (notamment durant les vagues de froid) et est, à l'échelle de la région Occitanie, la première source de production d'énergie renouvelable (10 TWh), loin devant l'éolien (2 TWh) et le photovoltaïque (1 TWh).

L'évolution de l'hydroélectricité s'inscrit dans un contexte politique double : celui de la transition énergétique et celui de la gestion intégrée des ressources en eau. De facto, le potentiel hydroélectrique est fortement lié à la disponibilité en eau et donc à son devenir dans un contexte de changement climatique. En effet, celui-ci va agir sur la capacité à produire (modifications des apports naturels alimentant le lac-réservoir amont en quantité et en temporalité) et sur la demande en énergie (modification des pics de demande liés aux vagues de froid notamment). Pour un réservoir multi-usage, d'autres activités demandeuses en eau pourraient être impactées et entrer en concurrence plus forte avec l'usage hydroélectricité.

Le devenir de l'hydroélectricité est illustré sur deux exemples où seuls les enjeux du changement climatique et de la gestion de l'eau ont été considérés.

Le devenir de la gestion des aménagements hydroélectriques du bassin de l'Ariège à Foix

Dans le cadre du projet IMAGINE2030 (Sauquet et al., 2010), un modèle hydrologique combiné à un module simplifié représentant la gestion des lacs-réservoirs, ses déterminants et les règles de placement de l'eau (stockage/déstockage conditionné par l'intérêt économique à turbiner) a été développé et alimenté par des projections climatiques à l'horizon 2030 établies sur la base de l'exercice AR4 du GIEC. Les simulations hydrologiques montrent des apports annuels aux barrages en baisse, une fonte de la neige plus précoce et une sévérité accrue des étiages en réponse à des températures plus élevées dès 2030 (de l'ordre de +1 à +2 °C à l'horizon 2030 en moyenne annuelle par rapport à la période 1970-1989).

Deux scénarios de gestion (figure 10.11) ont été testés : le premier « business as usual » et le second intégrant un soutien d'étiage estival augmenté au travers de l'augmentation du débit minimal à respecter. **Dans les deux cas, on constate à l'horizon 2030 un remplissage avancé des réservoirs sur l'Ariège, conséquence d'une onde de fonte plus précoce et d'une répartition des jours de déstockage modifiée.** En effet, le nombre annuel de jours où il y a un fort intérêt à effectuer des lâchers pour la production d'énergie - avec une température moyenne en France < 15 °C - diminue

tandis que le nombre annuel de jours où les lâchers sont nécessaires pour garantir un débit minimal augmente. Cela se traduit par une retenue moins mobilisée en hiver mais davantage en été et un niveau de remplissage plus haut en fin de printemps pour anticiper la contribution plus forte de ces réservoirs au soutien d'étiage estival en 2030. Dans le second scénario, la priorité donnée au soutien d'étiage au détriment de la production d'énergie implique une gestion très conservatrice en début d'année (un « creusement » moindre de la courbe de remplissage qu'avec le scénario « business-as-usual ») pour garantir le débit minimal.

La réponse aux perturbations climatiques des lacs-réservoirs des vallées des Nestes d'Aure et du Louron

Le second cas d'étude s'intéresse aux lacs-réservoirs des vallées des Nestes d'Aure et du Louron, dont la Société Hydro-Electrique du Midi (SHEM) a la concession depuis 2003. Chaque réservoir est géré en coordination avec les autres pour, d'une part, satisfaire des besoins en énergie et, d'autre part, pour réalimenter 17 affluents rive gauche de la Garonne situés dans le Plateau de Lannemezan. Un volume total de 48 Mm³ est ainsi réservé annuellement pour garantir les usages liés à l'irrigation, l'alimentation en eau potable et le bon état écologique des cours d'eau réalimentés du système Neste entre le 15 juin et le 1^{er} mars de l'année suivante. En fin de campagne de soutien d'étiage, la SHEM valorise l'eau restante pour la turbiner en privilégiant les jours pendant lesquels les prix de l'énergie sont les plus élevés. Au 1^{er} mars, les retenues sont à leur minimum.

Une analyse de sensibilité via une modélisation des apports aux lacs-réservoirs a été engagée afin de mesurer comment le potentiel de production réagit à des perturbations climatiques. Un premier diagnostic très grossier du fonctionnement du système consiste à examiner si les apports naturels peuvent garantir au moins 48 Mm³, ce qui permettra de conserver de l'eau pour le turbinage en hiver ; si ce n'est pas le cas, cette situation extrême est jugée « critique ». Des scénarios de changement climatique ont donc été créés pour explorer de façon systématique une gamme étendue des modifications possibles. L'analyse de sensibilité est résumée par une surface de réponse décrivant l'évolution des volumes annuels disponibles en amont des retenues en fonction des changements en précipitation et température. Sur ce graphique (figure 10.12) sont reportées les trajectoires climatiques des bassins d'alimentation des lacs-réservoirs d'après les simulations ADAMONT depuis 1980 jusque 2099. La courbe noire est construite à partir des projections RCP8.5 et la courbe grise à partir des projections RCP4.5. Ce graphique fait apparaître une zone critique pour le système Neste atteignable sous scénario

RCP8.5 en fin de siècle, c'est-à-dire une hausse de la température annuelle de plus de 4.5 °C et une baisse des précipitations annuelles de plus de 400 mm/an, qui ne permettront pas d'assurer l'intégralité des 48 Mm³ potentiellement requis et laissant peu d'opportunité de turbiner en hiver.

Brève synthèse

Dans les deux cas d'étude, l'effet attendu du changement climatique sur l'hydrologie naturelle des cours d'eau de montagne serait en premier lieu une élévation des températures de l'air avec une onde de fonte avancée et une réduction des précipitations sous forme de neige, modifiant la stratégie de remplissage des réservoirs (concomitant avec la période de fonte). De plus, la

baisse des apports aux réservoirs et donc du potentiel de production semble quasi certaine. A cette réduction, s'ajoutent pour le producteur d'hydroélectricité les « contraintes » réglementaires (débits écologiques et volume contractuel dédié à d'autres besoins). Le respect de ces contraintes exprimées à l'aval des réservoirs induit moins de flexibilité pour le déstockage de l'eau en période hivernale en réponse à la demande d'énergie dans le futur. **Dans ces conditions, l'hydroélectricité produite dans les Pyrénées ne pourra pas contribuer au réseau électrique français comme par le passé.** Ces évolutions interrogent donc la contribution de l'hydroélectricité à la production d'électricité dans les prochaines décennies et la vraisemblance de certains scénarios de mix énergétique.

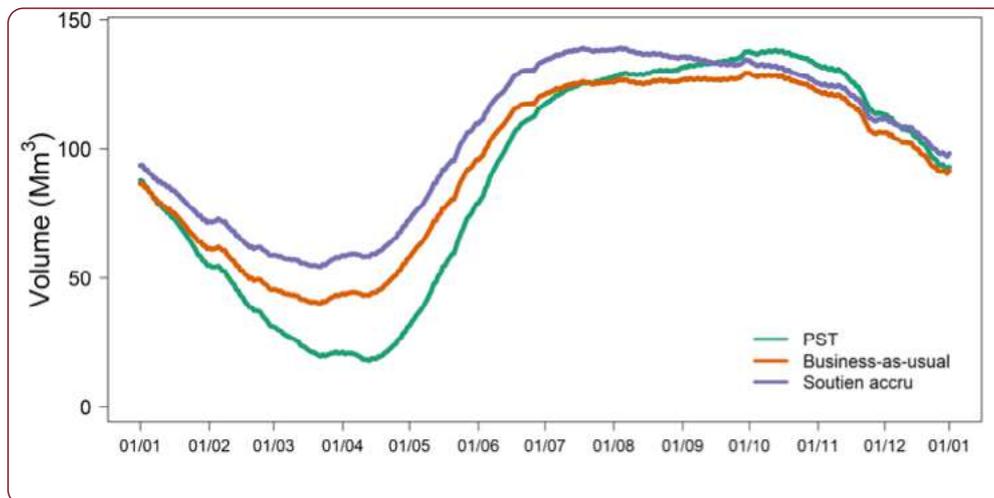


Figure 10.11. Courbe annuelle moyenne des volumes journaliers dans les réservoirs en amont de Foix, sur la période actuelle (PST), à l'horizon 2030 avec une gestion « business as usual » - contrainte de soutien du débit à la valeur objectif de 8 m³/s et à l'horizon 2030 avec une gestion considérant un soutien fixé à 12 m³/s (« soutien accru »).
(Source : d'après Hendrickx et Sauquet, 2013)

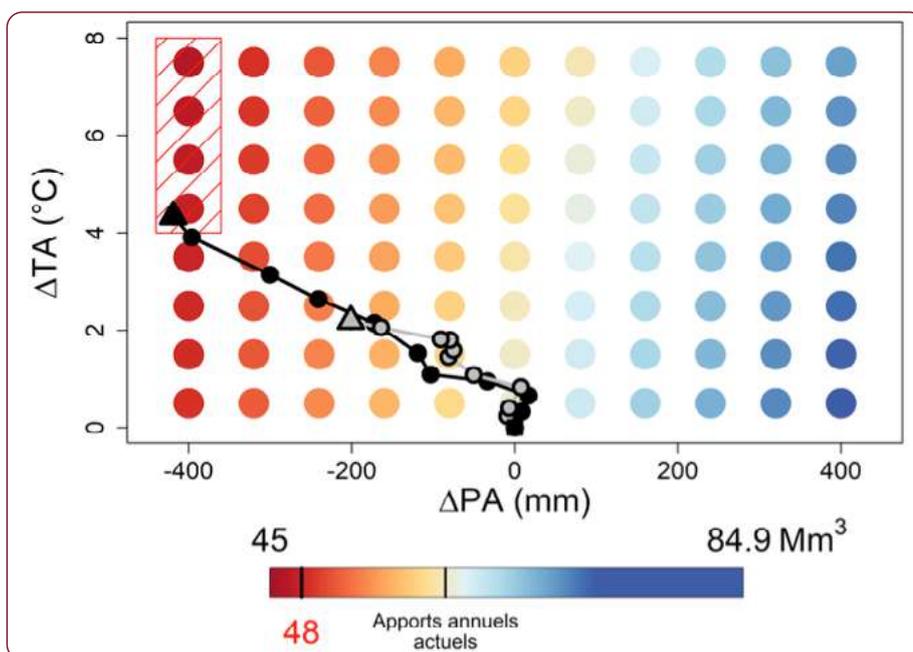


Figure 10.12. Surface de réponse caractérisant la sensibilité des apports naturels aux lacs-réservoirs des vallées des Nestes d'Aure et du Louron (hors Orédon) à des perturbations du climat. Les courbes représentent des trajectoires possibles de la période actuelle 1980-1999 (□) jusqu'à la fin de siècle 2080-2099 (Δ), échantillonnées tous les 10 ans (●) sous scénarios RCP4.5 (gris) et RCP8.5 (noir). Chaque point est représentatif d'une période glissante de 20 ans. La zone critique pour les usages en aval en termes de changement de climat (conduisant à des apports naturels inférieurs à 48 Mm³) est hachurée en rouge.
(Source : d'après Huang et al., in prep.)

Projet Clim2Power – quelles voies vers la neutralité carbone des systèmes électriques en Europe, sous la contrainte des évolutions climatiques ?

Camille PARROD (ACTeon), Gildas SIGGINI (Mines ParisTech - CMA), Edi ASSOUMOU (Mines ParisTech - CMA), Pierre STROSSER (ACTeon)

La variabilité climatique future (qui fait référence dans ce texte à 22 modèles de projections climatiques pour les deux scénarios RCP4.5 - stabilisation climatique intermédiaire - et RCP8.5 - réchauffement global plus élevé) aura des impacts sur la production d'électricité de sources renouvelables (en particulier éolienne et solaire) au niveau des pays (et groupes de pays) européens, qui diffèrent selon les scénarios climatiques.

En particulier, le projet de recherche européen Clim2Power a mis en évidence le niveau d'effort à fournir par les pays pour atteindre la neutralité carbone de l'électricité produite en 2050, tenant compte des effets combinés de la variabilité climatique (changements des précipitations, de l'irradiation solaire soit des heures d'ensoleillement, et de la configuration des vents), et des interactions au sein de l'ensemble du système électrique européen (**figure 10.13**).

Le graphique montre l'évolution du pourcentage d'électricité produite à partir d'une source d'énergie renouvelable à partir des valeurs historiques (moyenne 2013-2018) dans les barres grises, jusqu'en 2030 (vert clair) et 2050 (vert foncé). La plage de valeurs pour 2030 et 2050 reflète la variabilité des 22 projections climatiques futures envisagées. Dans certains cas, comme pour la Croatie, le pourcentage en 2030 peut diminuer par rapport aux valeurs actuelles pour certaines conditions climatiques futures. En France, les valeurs varient très peu et pointent vers une augmentation importante d'ici 2050.

Quant à l'évolution du pourcentage d'électricité produite à partir des sources éolienne et solaire en particulier, pour la France il y a peu d'incertitudes sur les augmentations nécessaires pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2030 et 2050.

Le service climatique développé par le projet fournit sous la forme de graphiques les résultats des modélisations énergétiques tenant compte de la variabilité climatique, déclinés par pays, et descendant jusqu'à des tranches horaires de 3 heures. Dans l'évolution optimale calculée par le modèle utilisé dans le cadre de ce projet, la capacité installée de production hydroélectrique, éolienne, solaire, etc. à l'échelle européenne et des Etats membres, est augmentée en 2030 et 2050 pour satisfaire la demande croissante d'électricité neutre en carbone. La capacité hydroélectrique supplémentaire installée en France dans les différents scénarios évolue entre 0 et 205 MW en 2030 et entre 137 MW et 478 MW en 2050.

Les impacts du changement climatique sont intégrés dans le modèle sous la forme de facteurs de disponibilité. De nouveaux facteurs de disponibilité sont calculés en tenant compte des données de pluviométrie, à l'échelle des jours-types pour le fil de l'eau, et à l'échelle des semaines-types pour les centrales munies de réservoirs. Le modèle ne tient toutefois pas compte de la demande en eau provenant des autres usages qui peut potentiellement limiter l'eau disponible pour la production électrique (en particulier lorsque les besoins sont les plus importants, et concordent avec des périodes d'étiages des cours d'eau (**encadré 10.A**)).

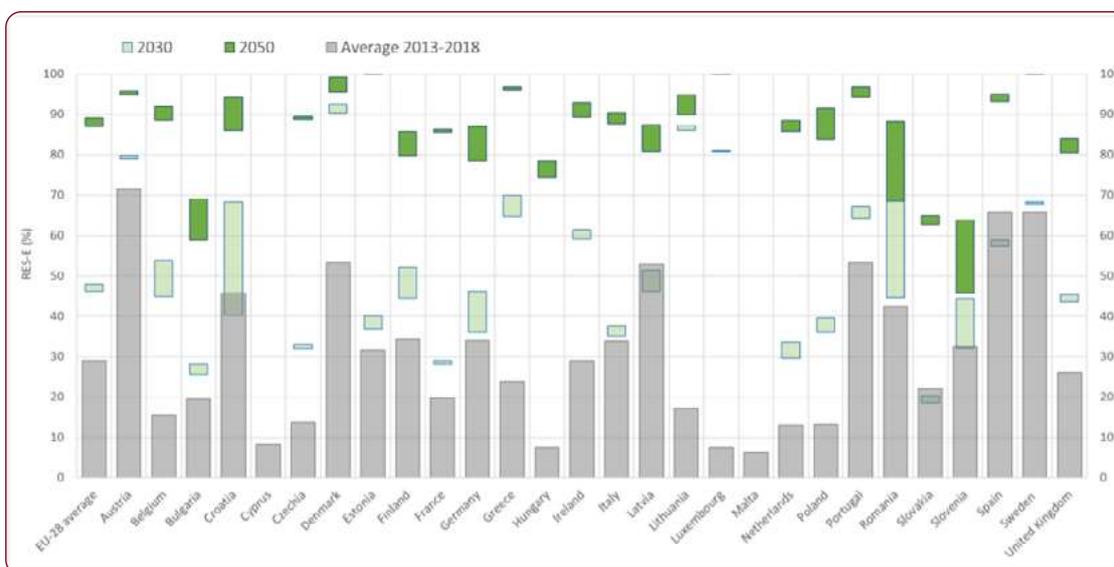


Figure 10.13. Pourcentage d'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables, vers un secteur énergétique neutre en carbone. (Source : ACTeon)

Encadré 10.A. Intégrer les pressions des usages de l'eau dans la modélisation climat – eau – hydroélectricité

Dans le cadre du projet Clim2Power, un modèle conceptuel a été développé autour d'un cas d'étude de retenue hydroélectrique en Occitanie pour représenter les liens entre les effets du changement climatique sur les ressources et les activités, le système hydrologique (à l'amont, au niveau de la retenue et à l'aval) et les besoins à la fois pour l'environnement et les activités consommatrices en eau, dont ceux nécessaires à la production hydroélectrique.

Ainsi, des paramètres d'entrée (principalement des paramètres climatiques) et de sortie (cf. ci-après) ont été définis pour les modules suivants :

- hydrologie/ressource en eau (évapotranspiration réelle, débit d'infiltration, taux de remplissage des nappes souterraines, débit des cours d'eau) ;
- énergie (prélèvements en volumes d'eau pour le refroidissement des centrales nucléaires, pour la production hydroélectrique et/ou thermique) ;
- agriculture (évaporation du sol, transpiration des végétaux et demande en eau pour l'irrigation/ les cultures pour ce qui est des productions végétales ; prélèvements en eau pour ce qui est des productions animales) ;
- alimentation en eau potable pour les résidents et les touristes (consommation unitaire par mois et par commune, prélèvements unitaires par mois et par commune) ;
- industrie (prélèvements en eau par secteur) ; tourisme et loisirs (besoins en eau moyen par type d'activités) ;
- écologie (besoins en eau par région et par surface couverte par des végétaux, variabilité de la distribution/répartition des espèces piscicoles par aire) ;
- gestion des retenues hydroélectriques (prélèvements dans la retenue pour chaque usage de l'eau, débits turbinés).

La mise à disposition d'un jeu de données cohérent (en termes d'unités de mesure, d'échelles temporelles et spatiales), qui n'a pu être constitué dans le cadre du projet, permettrait une application pratique du modèle et de construire des scénarios prospectifs mettant en évidence les contraintes pouvant peser sur la gestion des ouvrages et les marges de manœuvre à rechercher.

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Sensibiliser les professionnels de l'immobilier pour promouvoir les travaux de rénovation énergétique (Actimmo) - 34

GEFOSAT et Agence Locale de l'Énergie et du Climat de Montpellier Métropole - [En savoir plus](#)

Porté localement par l'association Gefosat et l'Agence Locale de l'Énergie et du Climat (ALEC) Montpellier Métropole, le programme national Actimmo vise à sensibiliser les professionnels de l'immobilier aux enjeux de la rénovation énergétique, ainsi qu'aux démarches à entreprendre lors de la rénovation d'un bien. De cette manière, ces professionnels sont plus à même de conseiller et renseigner leurs clients. En effet, l'acquisition d'un bien est le moment clef pour envisager des travaux de rénovation énergétique de grande envergure et ainsi participer activement à la transition énergétique pour atténuer les effets des changements climatiques et s'y adapter.

Les professionnels de l'immobilier s'engagent pour la rénovation énergétique performante de votre logement





CHAPITRE

11

GOUVERNANCE

Coordination :

Laura MICHEL et Julien WEISBEIN

Rédaction : Antoine DUCASTEL, Marie HRABANSKI, Éric IMBERT, Laura MICHEL, Julien WEISBEIN

La gouvernance climatique occitane, entre climatisation de l'existant et émergence d'un nouveau modèle ?

Laura MICHEL (UM - CEPEL), Julien WEISBEIN (SciencePo - LaSSP)

Le terme de « gouvernance » désigne, au-delà de l'explosion de définitions et d'usages pluriels qu'il a pu susciter dans de nombreux domaines, l'ensemble des situations de coopération entre autorités publiques et acteurs privés (associations, scientifiques, porteurs de projets et plus généralement citoyens) qui ne sont pas totalement ordonnées par la hiérarchie et qui visent à produire de la décision ou de l'action publique (Pasquier, Simoulin, Weisbein, 2013).

La notion intègre donc, contrairement à celle de « gouvernement » à laquelle elle est bien souvent opposée (figure 11.1), l'idée d'une ouverture des mécanismes de production des politiques publiques, d'une (relative) symétrie des acteurs qui y participent, d'une variabilité des modes de coordination qui s'établissent entre eux, d'un accroissement des matières et des enjeux ainsi abordés par cette technique gouvernancière. Elle renvoie également d'une forte complexification de l'action publique qui résulte de l'agrégation d'acteurs souvent très hétérogènes, de la difficulté à établir des mécanismes de redditions des comptes, de l'indifférenciation entre la décision et la mise en œuvre des programmes ou bien de la sélection d'instruments visant davantage à faire délibérer les parties prenantes sur une décision qu'à leur faire respecter une norme supérieure.

La question climatique en appelle donc plutôt à la gouvernance qu'au gouvernement et ce, en raison de ses caractéristiques spécifiques que tous les chapitres du Cahier Régional Occitanie sur les Changements Climatiques (CROCC_2021) ont pu abondamment illustrer jusque-là : sa transversalité, puisqu'elle traverse tous les secteurs de l'action publique régionale, sa complexité, puisqu'elle entremêle des considérations humaines et

biophysiques et reste tissée d'incertitudes, et son importance, puisqu'elle concerne tous les Occitans. On pourrait même parler de gouvernance élargie puisque les mécanismes de décision et surtout d'action dépassent le périmètre politico-administratif ou excèdent le seul aspect réglementaire.

Le but de ce chapitre est donc à la fois de donner des éléments sur la mise en œuvre à l'échelle de la Région Occitanie de toutes les politiques publiques climatiques mais également de voir, sur la base des chapitres précédents, ce qui fait signe vers une climatisation accrue de ces enjeux sectoriels. Vu d'Occitanie, constate-t-on une convergence ordonnée des politiques sectorielles et territoriales autour d'un mot d'ordre climatique ? Et d'un point de vue plus opérationnel, existe-t-il un véritable programme climatique ?

En l'absence de littérature spécifiquement dédiée à cette problématique de la climatisation des politiques régionales en Occitanie, nous nous proposons d'abord de recontextualiser cette climatisation des politiques régionales dans le processus plus large de re-territorialisation de l'action publique en France, puis d'analyser, à l'aune de la lecture des différents chapitres du CROCC_2021 et à partir de plusieurs variables (comme les budgets dédiés, les instruments sélectionnés, les personnels ou le portage politique qui se nichent derrière ces programmes), quels scénarii tendent à se dessiner, entre dispersion sectorielle, convergence doctrinale ou convergence opérationnelle des politiques occitanes du climat. Il s'agira également, dans une seconde partie, de tirer les conséquences des tendances générales dégagées, enjeu après enjeu.

	Nombre d'acteurs	Territoires prioritaires	Modes de coordination	Imputabilité et lisibilité de l'action publique	Séquence privilégiée	Instruments d'action publique
Gouvernement	Restreint (acteurs publics surtout)	Nation	Coercition, tutelle	Claire	Décision	Lois, planification économique
Gouvernance	Croissant (acteurs publics et privés)	Régions, Intercommunalités, Europe	Variables	Réversible, floue	Mise en œuvre	Contrats, délibération, normes

Figure 11.1. Deux modèles pour conduire l'action publique.
(Source : J. Weisbein)

Partie 1. La gouvernance du climat en région Occitanie : entre territorialisation de la politique climatique et climatisation des politiques sectorielles

Le changement climatique a été construit comme un problème public global et c'est d'abord à cette échelle qu'un processus de gouvernance s'est mis en place pour le traiter (Aykut et Dahan-Dalmédico, 2014). Les politiques d'atténuation, d'abord dominantes ont surtout été déclinées aux plans européen et national pour mettre en œuvre les objectifs chiffrés de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) du Protocole de Kyoto. Si la gouvernance climatique est censée se déployer du « global au local », ce n'est qu'à partir de la fin des années 2000 que la question d'une gouvernance territoriale du changement climatique commence à se dessiner.

1.1 Vers un agenda climatique à l'échelle nationale

En raison de « l'urgence climatique » et de son irréversibilité, le volet consacré à l'adaptation, jusqu'alors minoré au profit des politiques d'atténuation car jugé trop défaitiste, devient prioritaire dans les déclinaisons territoriales des politiques climatiques globales. On observe alors en France la construction d'une véritable politique nationale d'adaptation au changement climatique dans les années 2000, souvent par la reprise de démarches préexistantes en matière de développement durable (comme les Agendas 21), et qui se déploie d'abord dans une logique d'incitation, d'expérimentations et d'émulation (Bertrand, 2013), que ce soit avec la création de l'Observatoire National des Effets du Réchauffement Climatique (2001), la mise en place du Plan Climat National (2004), de la Stratégie Nationale d'Adaptation (2006) et du Plan National d'Adaptation (2011).

Aujourd'hui, le volet adaptation prend corps à travers les plans climat qui s'inscrivent dans une approche globale du changement climatique. Ceux-ci visent moins à créer de nouvelles politiques qu'à aborder de façon intégrée tout ce qui existe déjà dans les différentes politiques locales. Elles sont notamment surtout focalisées sur l'enjeu de l'énergie où l'on commence à observer une territorialisation de la politique énergétique de l'État, dès le milieu des années 2000¹ mais qui reste assez contrainte (Poupeau, 2013). En effet, pour cette deuxième génération des instruments climatiques, la logique incitative initiale fait place à une vision plus impérative (Béal et Pinson, 2013).

Il faudra attendre les lois Grenelle 1 et 2 de 2009 et 2010 afin de voir apparaître un investissement fort dans la lutte contre le changement climatique de la part de l'État, des collectivités territoriales, des entreprises mais aussi des citoyens. On a alors assisté à la mise en place de dispositifs (p. ex. la méthode Bilan Carbone de l'ADEME) de structures spécifiques (les Observatoires régionaux de l'Énergie, les Autorités organisatrices de l'Éner-

gie-AoEn, etc.) et de réseaux de politiques publiques, ainsi qu'au lancement de certains labels et appels à projets (Cit'Énergie, AACT-AIR PUMIQAT de l'ADEME, etc.). Depuis le Grenelle de l'environnement, on observe une tendance à la territorialisation de la politique environnementale en général et de la politique climatique en particulier (Lascoumes et al., 2014). Cela se traduit par des transferts de compétences mais aussi par des textes nationaux (lois, stratégies, plans...) qui prévoient des déclinaisons sur le territoire, sur le mode de l'obligation ou de l'incitation. Cela passe par plusieurs types de documents, notamment les Schémas ou les Plans, qui visent à intégrer la question climatique dans la fabrique des politiques territoriales. Force est de constater que l'innovation la plus importante en matière de climat a été apportée par les lois Grenelle 1 et 2 qui ont rendu obligatoire l'élaboration des Plans Climat-Énergie Territoriaux (PCET, première génération) et des Schémas régionaux climat-air-énergie (SRCAE) qui restent alors co-pilotés par la Région et le préfet.

Avec la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (TECV), les politiques climatiques sont désormais développées au sein des Plans Climat-Air-Énergie Territoriaux (PCAET, deuxième génération), permettant de cette manière la généralisation de la prise en charge « du problème climat » et du volet adaptation au niveau de l'action locale. Par ailleurs, la loi NOTRe a chargé les Régions d'élaborer un Schéma Régional d'Aménagement, de Développement Durable et d'Égalité des Territoires (SRADDET), qui remplace l'ancien Schéma Régional d'Aménagement et de Développement Durable du Territoire (SRADDT). Il s'agit d'un document stratégique de planification, désormais prescriptif, qui détermine les grandes priorités régionales en matière d'aménagement du territoire à moyen et long termes et qui intègre le SRCAE, qui n'est donc plus copiloté par l'État. Le rôle de la Région en matière climatique s'en trouve renforcé par ricochet (Evrard et Pasquier, 2018).

Ajoutons également que la loi MAPTAM (2014) a érigé la région au rang de « chef de file » pour l'exercice des compétences relatives au climat, à la qualité de l'air et à l'énergie. Les récentes réformes ou lois cherchent ainsi à clarifier le partage des compétences en matière climatique, sans y parvenir totalement. En particulier, si le rôle de chef de file de la Région est clairement affirmé, les compétences des EPCI – au premier rang desquels les Métropoles – sont également renforcées en matière climatique, via la loi MAPTAM (contribution à la transition énergétique) et la loi de 2015 sur la transition énergétique pour la croissance verte par exemple.

Enfin, différentes politiques nationales enjoignent les collectivités de prendre en compte le réchauffement climatique dans leur domaine. A titre d'exemple, la Stratégie nationale de gestion intégrée du trait de côte (SN-GITC) de 2012 incite les collectivités territoriales à mettre en place des stratégies d'adaptation au recul du trait de côte dans un contexte d'élévation du niveau de la mer lié au changement climatique.

De manière générale, ces textes nationaux se présentent comme des injonctions à l'action climatique pour les collectivités sans que la répartition des compétences et les moyens soient toujours clairement définis.

¹ La loi POPE de 2005 renforce les compétences des conseils régionaux en matière de maîtrise de l'énergie et leur donne, à travers les ressources de l'ADEME et des contrats de plan État-Région, les moyens de mettre en œuvre des actions plus ambitieuses.

1.2. Vers une territorialisation de la politique climatique nationale en Occitanie

Simultanément, les collectivités territoriales françaises se sont largement emparées du problème climat et ce, de manière proactive plus que réactive, œuvrant à la fois à l'échelle locale comme collaborant à l'échelle transnationale (Bertrand et Rocher, 2013). Les villes notamment sont devenues des acteurs importants de l'action climatique tant elles concentrent les compétences comme les ressources administratives ou financières sur cet enjeu qui les bouscule et les transforme en retour (Béal et al., 2011). La tendance à la métropolisation de l'action publique, à travers l'an III de la décentralisation (loi MAPTAM de 2014), leur donne, comme on l'a évoqué, d'autant plus d'importance dans la prise en compte du problème climat.

À Toulouse, devenue communauté urbaine en 2008 puis Métropole en 2015, une véritable action climatique s'est ainsi mise en place dans les années 2000-2010, d'abord à travers une démarche d'Agenda 21 en 2003, puis à travers un premier PCET en 2011, un PCAET en 2015 ainsi que de nombreuses initiatives et projets urbains liés à la question climatique, notamment le développement des écoquartiers (Parvu, 2020). De son côté, la Métropole de Montpellier a élaboré un premier Plan Climat plus tardivement, en 2014, dans la suite de son Agenda 21 lancé en 2008, transformé en PCAET en 2019. Toutefois, les travaux universitaires sur le sujet montpellierain font défaut. Les recherches, notamment financées dans le cadre de thèses CIFRE par la Métropole ont moins porté sur les questions climatiques que sur d'autres enjeux de développement durable qui ont fait l'objet d'un fort investissement de la part de la collectivité comme l'agroécologie et l'alimentation durable (Hasnaoui, 2018) ou les problématiques de biodiversité en lien avec la séquence Éviter-réduire-compenser (Bigard, 2018).

De même, la consécration de la Région comme chef de file en matière climatique fait écho à l'investissement développé par les Régions en la matière afin d'affirmer un peu plus le « pouvoir régional » (Pasquier, 2012). Sous ce prisme, on observe en leur sein une reconfiguration des jeux d'acteurs et une inflexion notable en matière de planification et d'environnement (Bertrand et Richard, 2013). Devenues avec les lois MAPTAM et LTECV (2015) « cheffes de file » dans de nombreux champs de l'action climatique et énergétique, elles détiennent en effet de nombreux atouts dans ce domaine : elles coordonnent les autres collectivités territoriales et les intègrent dans une perspective commune et cohérente en matière cli-

matique (le SRADDET est ainsi opposable, c'est-à-dire qu'il doit être repris par les autres collectivités territoriales dans leurs exercices de planification) ; elles redistribuent les financements issus de l'Union européenne (fonds structurels) ou de l'Etat (contrats de plan Etat-Région) ; et elles peuvent servir d'exemple à suivre en matière de sobriété énergétique, d'allocations budgétaires ou de gestion de leurs compétences spécifiques (comme les lycées).

De ce point de vue, la Région Occitanie s'est avérée très proactive en matière de politique climatique. Elle bénéficie pour cela d'une certaine tradition d'action en matière environnementale, notamment de la part de l'ancienne région Midi-Pyrénées qui en a fait une des régions les plus exemplaires en matière de développement durable, avec une agence dédiée (l'ARPE) et des expérimentations menées sur de petits espaces (villes, pays, sites d'exception, vallées, etc.) car privilégiées à une conception plus générique et régionalisée du développement durable (Bertrand, 2009)². Cette politique climatique occitane a pris corps dans les années 2010-2020 à travers de nombreux dispositifs imposés ou incités par la législation nationale et bien souvent dépassés par l'activisme de l'institution. De la sorte, le prisme climatique colore alors de plus en plus d'enjeux sectoriels.

En 2016, par exemple, l'objectif de la démarche H2O 2030, destinée à alimenter le volet eau du SRADDET alors en cours de constitution, était d'aboutir en 2018 à une stratégie régionale de gestion de l'eau durable et solidaire. Dans la même période, la Région Occitanie a rapidement affiché l'ambition de devenir la première Région européenne à énergie positive (REPOS). Ce projet constitue le volet énergie de son SRADDET et repose en particulier sur le développement d'une filière industrielle de l'éolien en mer, initié en Languedoc-Roussillon. La Région s'est alors saisie d'un appel à projet de l'État (ADEME, 2015) pour accompagner deux fermes pilotes au large de Gruissan et Port-la-Nouvelle, puis justifier l'extension du port industriel de Port-la-Nouvelle pour accueillir une plateforme de montage d'éoliennes et enfin développer sur ce site un maillon de la filière hydrogène vert émergente (Plan Hydrogène Vert) (Barone et Michel, 2021). Si le volontarisme énergétique régional est largement affiché, la poursuite de la politique de l'éolien offshore reste cependant largement conditionnée aux engagements de l'État, revus à la baisse dans le cadre de la dernière programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE 2019). La Région a certes montré une capacité à renégocier les objectifs en sa faveur, en mobilisant les acteurs locaux et en s'alliant aux autres régions productrices d'éolien offshore³ mais la gouvernance énergétique régionale reste en ce domaine partielle. Son autonomie est toutefois plus large dans d'autres domaines.

En novembre 2019, un « Green New Deal » est engagé par l'institution régionale occitane à la suite d'une démarche de co-construction avec une Convention citoyenne et d'une votation ayant mobilisé 20 644 personnes autour de 10 priorités thématiques dont de nombreuses ren-

voient à la question climatique (les transports, le modèle agricole et l'alimentation, ou bien le tourisme durable). Le budget participatif citoyen « Ma solution pour le climat », lancé en septembre 2019 et doté d'une enveloppe de 2 M€, a financé des initiatives qui contribuent à la lutte contre le réchauffement climatique (42 lauréats ont été ainsi sélectionnés pour la première édition, avec par exemple des projets de forêt urbaine, des actions de sensibilisation en direction des jeunes ou bien des applications de promotion du vélo pour smartphones).

Dernièrement, le projet de SRADDET de la Région Occitanie a été arrêté le 19 décembre 2019 et incarne le projet d'aménagement du territoire porté par la Région à l'horizon 2040. La réponse à l'urgence climatique compose ainsi un des deux « caps stratégiques pour le devenir du territoire ». Par ailleurs, le Plan régional d'adaptation au changement climatique voté en décembre 2020 et doté de 200 M€ sur 7 ans fusionne des dispositifs plus sectoriels existants comme la stratégie Région à Énergie Positive, les Plans Littoral 21 et H2o30, le Plan pour l'économie circulaire, le Pacte Alimentation durable ainsi que le budget participatif « Ma solution pour le climat ». Cette fusion témoigne de la volonté d'intégration sous l'angle climatique d'actions régionales existantes.

² Dans l'ex-Région Languedoc-Roussillon, une Agence méditerranéenne de l'environnement (AME) a précocement été créée en 1992, à la suite d'un accord électoral entre Jacques Blanc et trois élus Verts dont le soutien lui était nécessaire pour être élu président. L'Agence a mené une politique active jusqu'à sa dissolution en 2004 par le nouveau Président de Région Georges Frêche (Michel, 2012).

³ « Appel de Narbonne » du 15 novembre 2018 (400 signataires : acteurs publics, entreprises...) ; contre proposition à la PPE portée par une alliance des régions Bretagne, Occitanie, PACA et Pays de la Loire.

1.3. La climatisation des politiques sectorielles sur le territoire Occitanie

On voit à la lecture des différents chapitres de ce CROCC_2021, que de très nombreux secteurs intègrent

les effets et les enjeux du changement climatique : eau, tourisme, littoral, mobilité, biodiversité, etc. On parlera donc d'une climatisation de ces politiques sectorielles, dans la mesure où de nombreux acteurs se sont « rattachés à cette question en formulant leurs centres d'intérêts en termes climatiques » (Foyer, 2016). La climatisation renvoie ainsi à une dynamique qui vient souvent redéfinir des politiques existantes au nom du changement climatique, tout en les faisant évoluer plus ou moins : qu'il s'agisse de repenser le modèle touristique de la montagne et du littoral, de repenser les politiques de mobilité (vélo, trains, etc.), l'enjeu climatique impacte fortement ces différents domaines d'action.

Si on prend l'exemple littoral, l'ancienne Région Languedoc-Roussillon a été pionnière dans la gouvernance des risques d'érosion et de submersion marine. La Mission interministérielle à l'aménagement du littoral (MIAL) installée en 2000 a posé de nouveaux principes remettant en question le paradigme de la lutte contre la mer au profit d'une gestion douce et de la relocalisation des activités menacées (MIAL, 2003). Elle a structuré une communauté régionale experte – EID, BRGM, Universités de Montpellier et Perpignan...- qui a développé études et opérations durant une dizaine d'années en ce sens dans le cadre des contrats de projet État Région (CPER). La politisation de l'élévation du niveau de la mer liée au changement climatique, objectivée sur le territoire régional par les travaux de cette communauté experte, a donné une nouvelle visibilité aux enjeux littoraux et conforté leur statut de problème public nécessitant une politique d'anticipation. Elle a accompagné la requalification du problème de l'érosion comme risque « anticipable » dont la solution doit passer par la recomposition spatiale des territoires littoraux, doctrine entérinée par la publication de la Stratégie régionale de gestion intégrée du trait de côte (SRGITC) de la Région Occitanie publié en 2018 par l'État (Barone et Michel, 2021).

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Un réseau citoyen pour agir en faveur de la transition énergétique et écologique - 81

Réseau Bouge Ton Climat - [En savoir plus](#)

En 2018, des membres du conseil de développement du Pôle Territorial de l'Albigeois et des Bastides ont réalisé des écoutes citoyennes afin de recueillir le ressenti des habitants sur les problématiques liées aux changements climatiques. Suite à ces rencontres, les participants ont souhaité créer le Réseau Bouge Ton Climat pour poursuivre la dynamique et développer les projets citoyens en faveur de la transition énergétique et écologique.

Le Réseau Bouge Ton Climat a permis la concrétisation de certaines attentes suscitées lors des écoutes :

- la création d'une carte participative recensant les initiatives citoyennes en faveur de la transition écologique (38 actuellement) ;
- divers événements pour tisser du lien : visites d'expériences, ateliers, réunions avec les membres du réseau... ;

- un fonds d'initiatives citoyennes visant à soutenir financièrement les porteurs de projets collectifs lancé en juin 2021.



Crédit photo : Bouge ton climat.

Partie 2. Une climatisation de l'action publique à la croisée des chemins

La sociologie de l'action publique considère bien souvent les politiques publiques avant tout comme des institutions sociales (du latin *institutere* : faire tenir debout), c'est-à-dire des formes sociales pérennes car organisées autour d'acteurs et de paradigmes bien établis : on parlera alors de secteurs (comme le tourisme, l'agriculture, etc.), lesquels configurent efficacement l'action publique au sens où ils permettent de qualifier les enjeux tout comme de sélectionner les acteurs les plus à même de les résoudre. En matière d'environnement, ces secteurs déjà constitués ont pu ainsi à la fois retraduire cette thématique selon leur propre grammaire, mais aussi tendre à minorer celle-ci en fonction de leurs intérêts premiers (Rumpala, 2003). Or ce qui ressort des chapitres de ce CROCC_2021 est une sorte d'épreuve que le changement climatique impose à des configurations sectorielles pourtant bien établies. Détricotés, reconfigurés, ces secteurs dessinent une gouvernance climatique qui repose sur des formes plus horizontales (2.1), sur des instruments nouveaux (2.2) mais qui rencontre encore de nombreux freins et retards (2.3).

2.1. Une gouvernance qui appelle des formes plus horizontales

Le premier constat est celui d'une transversalité accrue des acteurs, qu'ils soient humains comme non-humains. Les divers chapitres laissent voir une extraordinaire diversité de professions ou de statuts engagés dans la gouvernance régionale du climat, au-delà des élus et des fonctionnaires. Les scientifiques et les citoyens en constituent deux figures centrales. La communauté scientifique, et plus largement les experts, comme les architectes urbanistes, sont particulièrement actifs dans la gouvernance climatique en Occitanie. Gouverner le climat à l'échelle régionale implique en effet la production de connaissances inscrites localement pour évaluer les impacts et accompagner la décision.

Dans le domaine du vivant, cela implique de surveiller la démographie des « non-humains » impactés par le changement climatique, notamment en raison de la probabilité d'extinction de certains d'entre eux (comme la centaurée de la Clape), et des adaptations forcées de certaines espèces à un environnement transformé (comme le thym). Sur le littoral les travaux de la communauté scientifique renseignent à la fois l'évolution du trait de côte (CEFREM, BRGM, Géosciences Montpellier), variable selon les territoires, le fonctionnement théorique et empirique des solutions fondées sur la nature (EID), les perceptions des élus et de la population (projet SOLTER, Rey-Valette et al., 2014), la prise en compte des risques dans la planification (CEPEL, G-EAU), la façon d'envisager la mise en œuvre de la recomposition spatiale (CEREMA, Consortium SAVE-EID), etc. Un effort accru de production de connaissances et d'anticipation est ainsi présent dans tous les chapitres.

Un effort d'articulation avec la décision régionale est également envisagé par la région Occitanie qui prévoit par exemple la création d'un groupe d'experts (pour modéliser un scénario d'adaptation) ou d'un Observatoire régional du littoral associant la communauté scientifique - dont les sciences sociales - pour accompagner la recomposition spatiale. Le projet RECO lui-même apparaît comme le prolongement et l'institutionnalisation de cette dynamique. Le monde scientifique (CNRS, INRAE, CIRAD, ONF, universités toulousaines et montpelliéraines, observatoires divers comme l'ATMO Occitanie) doit être particulièrement connecté aux circuits de prise de décision et d'action car c'est de lui que proviennent les données qui permettent tant de mesurer l'ampleur des transformations que de nourrir les modèles qui permettent d'agir en situation d'incertitude. La science autorise en effet des diagnostics au présent comme des prévisions au futur. Surtout, elle permet de calibrer l'action (comme la sélection des essences les plus adaptables pour les politiques forestières, un véritable pilotage de la mer grâce aux capteurs et autres satellites qui l'observent, ou bien un monitoring des ICU grâce à la télédétection spatiale). À ce sujet, l'existence de collectifs scientifiques occitans à la fois denses et spécialisés est une ressource d'importance pour la gouvernance climatique régionale, comme le démontrent les chapitres sur le littoral ou sur la santé publique. Un effort d'interdisciplinarité est notamment demandé afin de féconder des communautés disciplinaires parfois un peu trop rigides et marquées par des routines.

Les citoyens sont également mobilisés dans la gouvernance du climat en Occitanie, sous différentes figures et par différents dispositifs. Les plans et schémas introduits par la législation nationale comportent tous une dimension concertative. Ils mettent souvent en avant des démarches de co-construction avec les citoyens, comme à Toulouse le « Congrès des citoyens » du premier Agenda 21 de la ville en 2005 (Parvu, 2020), les « ateliers de co-construction » du premier PCET de la Communauté Urbaine du Grand Toulouse (Danjoie, Molina, Weisbein, 2013) ou bien le « Forum citoyen » du PCAET de 2015. Le Plan régional d'adaptation au changement climatique de la Région Occitanie prévoit la création d'un Parlement du climat afin de partager les expériences et proposer des actions prioritaires. La Convention citoyenne régionale sur le Green New Deal s'inscrit également dans cette perspective de participation citoyenne. Sur un modèle plus horizontal et par le bas, les initiatives climatiques directement issues des citoyens se développent également, comme en attestent les « villes en transition » (par exemple à Sète, à Toulouse ou à Pézenas) ou les nombreux projets citoyens en matière d'énergie (**voir chapitre-enjeu Mobilité et Énergie**). Enfin, la gouvernance régionale du climat appelle une coopération inter-sectorielle entre acteurs issus d'univers différents, comme en témoignent par exemple les chapitres sur le tourisme ou l'eau. Les acteurs économiques sont ainsi appelés à jouer un rôle dans la gouvernance climatique. C'est le cas par exemple des agriculteurs dans la gestion de l'eau.

L'action sur la ville nécessite également un travail conjoint entre une grande diversité de professionnels, y compris les promoteurs. Dans le cas de la recomposition spatiale des territoires littoraux, s'y ajoutent les campings, notaires, assureurs ou agences immobilières. À ce stade, ces acteurs économiques, s'ils sont bien identifiés, ne sont pas nécessairement mobilisés dans la gouvernance du climat en Occitanie, ou de manière très hétérogène selon les cas envisagés. Outre la diversité des acteurs, un deuxième constat général est celui d'une gouvernance qui, à l'échelle de l'Occitanie, implique différentes échelles d'action publique et dans certains cas, un début de gouvernance multi-niveaux. Les communes sont ainsi actives, via les plans climat, mais plus généralement à travers leurs politiques urbaines ou en matière de tourisme ou de mobilité. Des mutualisations et coopérations plus larges se dessinent entre collectivités, par exemple pour gouverner l'adaptation au changement climatique des territoires de montagne ou littoraux. La Région tente de jouer ici son rôle de chef de file en organisant et accompagnant l'articulation et la coopération entre les différents niveaux de collectivités publiques. Dans le cas du littoral, par exemple, une gouvernance multi-niveaux de l'adaptation à l'élévation du niveau de la mer connaît actuellement une accélération. Elle s'appuie sur la dynamique de la MIAL et des précédents CPER qui ont posé les bases d'un travail commun entre l'État, la Région, certains départements (Hérault notamment) et territoires (communes, EPCI), auxquels il faut ajouter le Conservatoire du littoral, la communauté experte déjà mentionnée et plus récemment, le Parc Marin, l'Observatoire de la côte catalane. Le Plan littoral 21 (PL21) a permis de donner un nouveau souffle à cette gouvernance pour se saisir de la question de la recomposition spatiale. Elle est pilotée par le tandem État-Région et s'appuie à la fois sur le SRADDET (Région), qui contient un volet littoral, et sur la Stratégie régionale de gestion intégrée du trait de côte qui constitue la doctrine de l'État sur le sujet.

Au-delà de nombreuses expérimentations menées sur le territoire, une mission est en cours (consortium SAVE-EID) pour co-construire les stratégies locales de recomposition spatiale avec les acteurs locaux et mettre en place un Observatoire à l'échelle régionale. On pourrait qualifier cette gouvernance d'interventionniste (Knill, Tosun, 2012) dans la mesure où, pour l'instant, elle agrège surtout des acteurs publics, avec un rôle clé du tandem État-Région et que le niveau de coopération avec les acteurs privés n'est pas encore très développé. Cependant, on est bien en présence de la construction d'une gouvernance multi-niveaux, avec des objectifs et modalités d'action définies (SRGITC, SRADDET) ou en cours de co-construction (stratégies locales), avec des moyens financiers pour accompagner la politique de recomposition spatiale via le PL21 et un plan d'actions prévu au CPER. De nombreux travaux ont été menés dans la durée sur ce sujet en Occitanie depuis les années 2000 ou sont en cours (via notamment le Save-EID, CEEM, CEP, G-EAU).

Un nouveau projet financé par la Fondation de France (2022) porté par le CEEM s'intéresse plus particulièrement aux trajectoires d'adaptation dans une dimension dynamique et progressive en contexte d'incertitude (« *Dynamic adaptive policy pathways* »). Cette recherche associe les acteurs publics, dont la Région et la DREAL Occitanie. On compte également de nombreux travaux sur la gouvernance de l'eau au regard du changement climatique en Occitanie mentionnés dans le chapitre éponyme. En revanche, nous n'avons pas de visibilité sur des travaux traitant de la gouvernance climatique dans d'autres domaines.

2.2. Des instruments nouveaux

De nombreux travaux interrogent de plus en plus l'action publique à travers ses instruments, c'est-à-dire à travers les modalités concrètes par lesquelles les décisions sont produites et opérationnalisées. Le « comment » de la conduite des politiques publiques a en effet un impact très fort sur leur contenu, les instruments retenus ayant des effets propres sur l'action entreprise (Lascombes et Le Galès, 2005). Mieux vaut donc bien les sélectionner pour mieux calibrer l'action climatique – et là aussi, les chapitres du CROCC_2021 sont riches d'enseignements quant à ce que pourrait être l'instrumentation climatique. La gouvernance climatique se caractérise ainsi par un *policy mix* en termes d'usage d'instruments d'action publique existants et nouveaux. Sont en particulier mobilisés des instruments incitatifs ayant vocation à stimuler les démarches innovantes, notamment à travers des appels à projets, expérimentations. Les chapitres de ce CROCC_2021 peuvent être lus comme un immense catalogue de projets scientifiques, de collaborations innovantes visant tant à produire et accumuler des données qu'à façonner les instruments pour les exploiter, comme l'appel à projet lancé conjointement par l'ARS et la DREAL autour des solutions à apporter en termes d'adaptation.

Dans le domaine littoral également de nombreuses expérimentations ont eu lieu ou sont en cours pour l'adaptation au recul du trait de côte (**voir chapitre-enjeu Milieux littoraux**). Les dispositifs de co-construction, concertation ou participation sont également mobilisés pour associer largement les citoyens ou parties prenantes à la prise de décision (p. ex. Assemblée citoyenne de la Région). Une nouvelle polarité de la gouvernance climatique, du top-down au bottom-up se dessine ainsi. Les citoyens prouvent qu'ils sont capables non seulement de décider par eux-mêmes mais également d'agir pour eux-mêmes, comme le démontre le réseau ECLR et ses plus de 70 projets d'énergies renouvelables financés et gouvernés par des citoyens avec l'aide de collectivités. Parfois, les solutions de remédiation de la nature sont dans la nature elle-même et s'avèrent assez faciles à mettre en place, qu'il s'agisse de ganivelles ou du traitement bio-inspiré des eaux industrielles que façonne la start-up Bioinspir (**voir chapitre-enjeu Santé**).

Ces SafN (solutions d'adaptation fondées sur la nature) sont particulièrement mobilisables en urbanisme, avec des opérations de renaturation des milieux urbanisés qui permettent d'amoindrir les ICU, de réduire la pollution atmosphérique, de favoriser la biodiversité, et plus généralement, d'améliorer la qualité de vie des urbains (**voir chapitre-enjeu Biodiversité et chapitre-enjeu Milieux urbains**). En lien avec le rôle de la connaissance déjà souligné dans la gouvernance climatique, on notera l'importance des instruments scientifiques (modèles, applications, instruments de mesure, etc.). Les enjeux de connaissance sont dès lors nombreux : disponibilité des données et des enquêtes, paramétrage des modèles, existence de ressources humaines scientifiques (et de ce point de vue, l'Occitanie peut compter sur un riche écosystème fait de nombreuses équipes et réseaux de recherche, notamment sur les questions maritimes ou urbaines), entretien des dispositifs de mesure, etc. Cette production de connaissances alimente à son tour des instruments de prospective conçus pour répondre aux besoins d'anticipation que nécessitent les politiques d'adaptation. En découlent des scénarios de prospective, la construction de trajectoires climatiques qui doivent permettre de calibrer efficacement l'action publique dans le temps long. Plusieurs exercices de prospective sur l'évolution des usages anthropiques de l'eau ont ainsi été menés en Occitanie (**voir chapitre-enjeu Eau**). Des travaux de prospective participative lancés par la DREAL ([Morvan et al., 2013](#)) ont aussi été menés à l'horizon 2050 ainsi qu'en termes de trajectoires sont également en cours pour le littoral.

Car c'est bien là un aspect central de la gouvernance de l'adaptation au changement climatique : penser l'action publique dans le temps long. De ce point de vue, se multiplient les outils tels que les stratégies, plans, programmes qui fixent des objectifs et des orientations dans une dimension performative plus que contraignante ([Rocle, 2017](#)). Parallèlement, les outils de la planification territoriale – SRADDET, SCoT, PLU(i) sont progressivement chargés par le législateur d'intégrer l'adaptation aux risques climatiques. Ces instruments de planification territoriale offrent ainsi un cadre pour penser un aménagement du territoire ou un urbanisme adapté au changement climatique.

2.3. Des freins et des retards à combler

Un certain nombre d'obstacles à la gouvernance climatique ressortent toutefois des chapitres. En creux, émerge la problématique des financements. Coûts des trains de nuit, gratuité des transports collectifs dans quatre villes d'Occitanie, ingénierie scientifique à entretenir... : les politiques de mobilité durable coûtent davantage. Sans oublier les éventuels paradoxes qui découlent des modes de financement, comme la fiscalité assise sur la construction qui apparaît en tension avec les volontés de repenser l'aménagement urbain ou la recomposition spatiale sur le littoral. Cette tension financière recoupe une tension institutionnelle entre les collectivités territoriales d'Occitanie et l'État qui reste

maître des règles de la fiscalité locale et pèse plus largement sur les ressources financières des collectivités. Dans bien des cas, les financements de l'adaptation au changement climatique ne sont pas (encore) stabilisés, et pèsent sur la capacité à se projeter dans l'avenir.

Par ailleurs, il ressort des chapitres des tensions autour de la coordination des usages potentiellement conflictuels. En ce qui concerne l'eau, le changement climatique induit une pression sur les quantités d'eau : « la gestion quantitative passe d'un registre technique (construire des infrastructures d'accès à l'eau) à un registre de gouvernance (organiser le partage de l'eau entre les usages) ». En matière d'aménagement, la gouvernance se heurte à des conflits entre les différents usages ou intérêts en présence : promoteurs (pression foncière), automobilistes vs cyclistes, transports collectifs ou piétons. Plus généralement, la mise en œuvre des politiques climatiques dépend non seulement des compétences de chaque collectivité mais aussi de l'activité politique locale, autrement dit, du degré de politisation des politiques climatiques, ce qui rend spécifique l'action de chaque collectivité territoriale engagée dans la lutte contre le changement climatique. L'obligation de transversalité induite par cette dernière (notamment à travers les exercices de planification) s'avère ainsi bien souvent obérée par la difficulté à rassembler des acteurs nombreux et hétérogènes autour d'une même grille de lecture.

À cet égard, l'exemple de la politique climatique de Toulouse Métropole est assez emblématique de ces difficultés à inscrire dans un territoire précis des normes parfois contradictoires, ainsi qu'à articuler des exigences multiples (politiques, administratives, économiques) et des instruments de planification qui s'empilent et s'avèrent très chronophages dans leur mise en œuvre et leurs révisions, le tout dans un moment de très forte fluidité institutionnelle et politique. Dans sa thèse de science politique, Laura Parvu montre bien en quoi l'institutionnalisation de cette action publique dans la ville rose a pu être heurtée, des premiers Agendas 21 en 2003 au premier PCET en 2011, puis aux nombreux dispositifs mis en place ultérieurement, comme le PCAET de 2015, les écoquartiers ou bien le projet européen Miu Ciudad AC2 ([Parvu, 2020](#)). Les changements de majorité municipale (en 2008 et en 2014) ont également joué dans cette complexification de l'action climatique toulousaine, surtout qu'ils se sont accompagnés de changements institutionnels induits par la relance de la décentralisation et la métropolisation (mise en place de la Communauté urbaine du grand Toulouse (CUGT) en 2008 puis de la Métropole en 2015, mise en place des Pôles territoriaux en 2011, etc.).

Autre exemple, cette fois-ci plus sectoriel, de dysfonctionnement affectant la planification territoriale, on observe que la coordination des politiques d'urbanisme et de transports ferroviaires à Toulouse s'est avérée insuffisante pour renouveler véritablement la gouvernance métropolitaine en la matière ([Maulat, 2016](#)).

On observe également avec la Région Occitanie de telles difficultés à orienter autour d'un même cap des institutions qui s'avèrent parfois assez lourdes à manœuvrer. Ainsi, de la production des Schémas régionaux, qui nécessitent toute une ingénierie en interne, peuplée d'acteurs souvent hétérogènes (avec des COPIL ou autres cabinets de conseil extérieurs) et qui, s'ajustant parfois difficilement entre eux, co-construisent un document jugé souvent insuffisamment autoréférentiel pour normer leurs comportements et leurs représentations (Bailleul, 2017).

De même se pose la question de l'articulation des échelles, spatiales et temporelles. Des temporalités apparaissent parfois contrastées : les enjeux comme le degré de connaissances ne sont pas les mêmes à court, moyen et long terme. Dans le même ordre d'idée scalaire, les découpages administratifs ne répondent pas forcément à l'échelle des problèmes climatiques. La coordination entre les différents acteurs du territoire requiert un apprentissage. Elle peut rester difficile, notamment dans l'ex Languedoc-Roussillon marqué par une culture politique conflictuelle. Le contexte de la fusion tout comme le renouvellement des élites locales lors des dernières élections pourrait de ce point de vue ouvrir une fenêtre d'opportunité pour penser « l'inter-territorialité » (Barone et Michel, 2022, à paraître).

On relève également des freins de perception et l'adhésion parfois problématique au « grand récit » climatique : l'attachement à un lieu et à ses aménités peut grandement freiner la mise en œuvre de politiques contraignantes quant aux usages qui en sont faits, comme on

l'observe tout particulièrement sur les littoraux occitans. Peuvent également jouer des biais d'optimisme qui tendent à faire minorer l'ampleur des dangers (Rey-Valette et al., 2012). Des routines et des pesanteurs sont également constatables, à l'instar de l'usage de la voiture qui ne laisse au vélo qu'une part infime des déplacements en Occitanie (à peine 2 %) et que même certaines politiques municipales de gratuité des transports publics peinent à limiter.

Les limites des prévisions (et notamment le fait que l'exercice de modélisation dépend grandement d'artefacts techniques, que les relations causales entre les phénomènes climatiques et humains s'avèrent multiples et enchevêtrées ou bien en raison de l'indisponibilité de données précises ; voir chapitre-enjeu **Enjeux psychosociologiques**) laissent persister des zones d'incertitude : par exemple, les projections en matière d'incendies dépendent fortement des modèles climatiques utilisés ; il reste toujours difficile de prévoir les inondations en raison de la variabilité des pluies intenses et de leur résistance aux modèles de prévision ; de même, on manque toujours de données relatives à la modification de la composition chimique de l'air induite par les dérèglements climatiques en Occitanie...

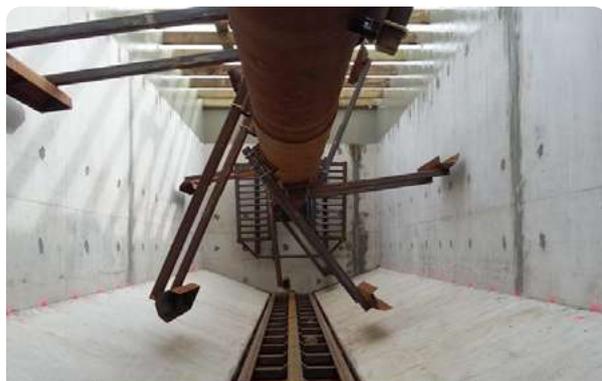
Les relations mondes scientifiques/décideurs restent d'ailleurs un angle mort de la gouvernance climatique. À l'exception d'agences comme l'ADEME, l'AUAT ou l'ARS, il manque toujours des institutions interface entre science et décision dans de nombreux secteurs (politiques maritimes, tourisme, biodiversité).

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Centres Méthanisation : une unité de méthanisation gérée par une gouvernance participative et locale - 12 Centres Agri Énergie - *En savoir plus*

Le projet de Centres Méthanisation est un projet collectif d'exploitations agricoles de taille moyenne sur le territoire de Centres en Aveyron, au sein duquel sera mise en place une unité de méthanisation. Ce projet doit être géré localement, à travers un portage réunissant agriculteurs, citoyens et élus. Le groupe projet initial est resté ouvert à toute personne souhaitant travailler au développement de la démarche et du projet.

Fort de cette gouvernance participative, le projet de méthanisation a différents objectifs, tant pour les agriculteurs (développer une agriculture économe en intrants, diminuer les gaz à effet de serre issus des activités agricoles, mieux maîtriser l'épandage d'azote, contribuer à un schéma d'économie circulaire territoriale, etc.), que pour le territoire et ses parties prenantes (investissement dans un projet rentable de production d'une énergie renouvelable, le biogaz produisant lui-même de l'électricité et de la chaleur en continu, implication des parties prenantes dans un projet créateur de valeur ajoutée, développement territorial via d'autres initiatives, etc.).



Crédit photo : INEVAL et Centres Agri Énergie

Adapter l'agriculture au changement climatique : instruments et mise en oeuvre

Marie HRABANSKI (CIRAD - ArtDev)

L'intégration des enjeux d'adaptation de l'agriculture dans la gouvernance globale du climat dans les années 2000 (Hrabanski, 2020) a induit des changements dans les espaces politiques nationaux et dans les territoires. Toutefois, l'inflation des documents de politiques publiques, des projets et programmes en faveur de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique et sa mise en politique ne signifient pas forcément que ces intentions se soient concrètement traduites dans des instruments de politiques publiques.

A partir d'une analyse qualitative (entretiens, analyses des archives et de la littérature grise), le projet TYPOCLIM analyse et compare l'évolution des instruments politiques d'adaptation de l'agriculture au changement climatique dans 8 territoires, au Nord (France-Occitanie, France-Guadeloupe, Espagne-Andalousie, Etats-Unis-Californie) et au Sud (Sénégal-Niayes, Afrique du Sud-Western Cape, Colombie, Brésil-Nordeste).

En s'appuyant sur la typologie classique de Bemelmans-Videc et al. (2011), on peut classer les instruments d'action publique de la façon suivante : les instruments réglementaires, qui sont contraignants et obligatoires (restriction ou interdiction des prélèvements en eau, seuil de pollution...), les instruments incitatifs, qui visent à modifier essentiellement des pratiques via des incitations financières (subventions, mesures agro-environnementales et climatiques...) et les instruments communicationnels (observatoire du changement climatique, services de prévisions météorologiques, Groupement d'intérêt économique et environnemental) dont l'objectif est de faire évoluer les cadrages cognitifs des acteurs de façon à ce que ceux-ci intègrent davantage les enjeux du changement climatique dans leurs pratiques.

En Occitanie, la gouvernance de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique est d'abord marquée par une diversité d'instruments, portés par des acteurs hétérogènes et multiniveaux (Région, Départements, Etat, UE, organisations professionnelles, ONG...). Plus de la moitié des instruments d'adaptation de l'agriculture au changement climatique recensés en Occitanie sont de type incitatif. Les instruments communicationnels sont également privilégiés. On remarque donc une préférence marquée pour les instruments non contraignants.

L'enquête souligne également un recyclage instrumental important. En effet, de nombreux instruments existant de longue date ont intégré les enjeux climatiques dans leur justification et leurs objectifs ou même dans l'appellation même de l'instrument sans pour autant que la dimension climatique transforme véritablement

les conditions d'éligibilité de l'instrument. Par exemple, les mesures agro-environnementales ont été introduites dans le cadre de la réforme de la Politique agricole commune (PAC) de 1992 puis sont devenues des mesures agro-environnementales territorialisées (programmation 2007-2013) et se nomment désormais, dans le cadre de la PAC 2015-2020 des mesures agro-environnementales et climatiques, sans pour autant que cette mesure n'ait véritablement évolué.

Parallèlement à ce processus de recyclage, on identifie des formes d'innovation instrumentale. Ces nouveaux instruments d'adaptation de l'agriculture au changement climatique sont principalement de type communicationnel. Moins coûteux que les instruments incitatifs, ces instruments visent à capitaliser des informations utiles à l'adaptation de l'agriculture au changement climatique et à coordonner des stratégies d'adaptation. Enfin, aucun instrument réglementaire explicitement tourné vers l'adaptation n'a été recensé, mais seulement certaines restrictions qui concernent les prélèvements et les usages de l'eau.

Si la gouvernance de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique en Occitanie repose essentiellement sur des instruments non-contraignants, les enquêtes menées dans le cadre du projet TYPOCLIM et plus largement les études menées à l'international soulignent la pertinence des combinaisons d'instruments (*policy-mix*) (Pacheco-vega, 2020), c'est-à-dire l'association d'instruments qui soient à la fois réglementaires, incitatifs et communicationnels.

Enfin, l'enquête montre également (dans les pays du Sud comme dans les pays du Nord, le cas échéant en Occitanie) un recours majeur au mode de gouvernement par projet pour adapter l'agriculture au changement climatique (Barone et al., 2018). Ce gouvernement par projet impose ainsi des conditions d'éligibilité et un travail bureaucratique important afin que les porteurs de projet puissent bénéficier des financements proposés dans le cadre d'appels à projets compétitifs. La précarité des projets, c'est-à-dire leur court-termisme, caractérisé par leur inadéquation avec le temps long, pourtant nécessaire à l'adaptation de l'agriculture au changement climatique et à l'action collective constitue une limite de ce mode de gouvernement. La fragilité des projets, c'est-à-dire leur sensibilité aux chocs internes ou externes figure également comme une des limites fortes du gouvernement par projet, de même que la prolifération des projets d'adaptation qui peut gêner, voire déstructurer la cohérence des politiques publiques d'adaptation de l'agriculture au changement climatique.

Financer la transition écologique et énergétique en Occitanie : une analyse de la tuyauterie des circuits de financement

Antoine DUCASTEL (CIRAD - ArtDev)

Les dispositifs publics de financement dédiés à la transition écologique et énergétique (TEE) se sont multipliés au cours des dernières années : fonds chaleur et déchet, Appels à projets (AAP) Territoire à Énergie Positive pour la Croissance Verte (TEPCV), Certificat d'économie d'énergie (CEE), France Relance 2020. Ces financements sont gérés et distribués par une diversité d'institutions publiques (ADEME, collectivités, DREAL, Caisse des dépôts et consignations, Agence Régionale Energie Climat, etc.) et fléchés vers les secteurs prioritaires de la TEE (SNBC 2020) : énergies renouvelables, mobilité durable, agroécologie, rénovation des bâtiments, etc.

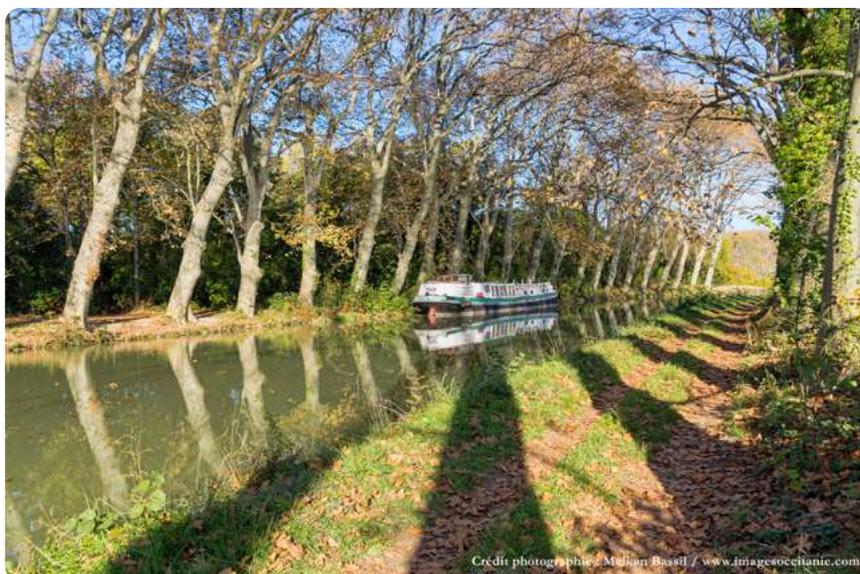
Toutefois, l'offre de financement existante ne rencontre pas toujours une demande, autrement dit des porteurs de projets engagés dans la TEE et qui soient capables de répondre aux critères d'éligibilité sur le plan technique, administratif ou financier. En effet, nous observons une contradiction persistante entre des porteurs (collectivités, entreprises, associations) qui déplorent l'absence de financement, et les financeurs l'absence de projets (Cohen et al., 2018). L'équipe de recherche pluridisciplinaire en science sociale (sociologie, économie, science politique, géographie) du projet INTEERface s'intéresse justement aux circuits de financements de la TEE et en particulier aux facteurs économiques, sociaux et politiques qui permettent, ou entravent, l'atterrissage de ces financements dans les territoires d'Occitanie.

La région Occitanie est un cas d'étude intéressant pour observer la mise en adéquation et la conformité entre des financements publics pour la TEE d'une part, des structures sociales, économiques et politiques d'autre part. En effet, l'Occitanie recèle un important potentiel en vertu de ses caractéristiques géographiques et natu-

relles, notamment pour le développement des énergies renouvelables, ou du volontarisme politique de nombreuses collectivités à commencer par la Région (Scénario REPOS 2018). Toutefois, la région est traversée par de profondes inégalités sociales et territoriales qui conditionnent et contraignent la TEE et son financement.

Pour analyser la tuyauterie des circuits et l'atterrissage des financements, nous adoptons une approche par le bas et territorialisée. Concrètement, nous partons des projets de TEE existants en Occitanie pour remonter ensuite le long des flux financiers qui les irriguent. Par ailleurs, nous accordons une attention particulière aux expériences et aux pratiques des acteurs tout au long des circuits : chargés de projet et instructeurs au sein d'institutions financières publiques ou de collectivités, entrepreneurs, élus, etc.

Dans un premier temps, l'équipe du projet INTEERface s'attachera à élaborer un panorama des financements TEE en Occitanie, en s'inspirant notamment du travail réalisé par l'I4CE à l'échelle nationale (I4CE 2020). L'analyse statistique multidimensionnelle et l'analyse de flux nous permettra de dresser une cartographie régionale dynamique des projets et des financements TEE depuis la fusion régionale. Cette analyse quantitative met en lumière la répartition spatiale (entre différents territoires et collectivités) et sociale (entre différents porteurs) des financements. Dans un second temps, l'étude qualitative et comparative de dispositifs financiers (guichet, appel à projet) et de projets spécifiques, de la phase de montage à l'opérationnalisation, mettra en lumière les multiples facteurs sociaux sous-jacents à la rencontre durable entre des financements et des porteurs.



Credit photographie : Melhan Bassil / www.imagesoccitanie.com

Quelle gestion pour la biodiversité ?

Éric IMBERT (UM - ISEM)

Actuellement, les mesures de gestion de la biodiversité conduites *in situ* sont essentiellement en lien avec une gestion de l'habitat (restauration des milieux ouverts, maintien d'une trame paysagère...). Les menaces plus globales, comme celles associées aux changements climatiques, nécessitent de réfléchir à des nouvelles actions de gestion (**voir chapitre-enjeu Biodiversité**).

Par exemple, pour la gestion des cultures forestières, le déplacement volontaire d'une espèce dans un territoire situé en dehors de son aire actuelle de distribution, mais potentiellement favorable dans le futur, est préconisé. Une autre voie de réflexion est celle des micro-refuges qui consiste à définir, dans l'aire de répartition actuelle d'une espèce donnée, des zones ayant des micro-climats où les effets du réchauffement climatique seraient moins importants. Cette approche est applicable pour des espèces avec des aires de répartition suffisamment vastes pour que des zones de micro-climats puissent se trouver.

Pour des espèces à faible aire de répartition, les micro-endémiques comme la Centaurée de la Clape, une combinaison des deux approches est possible en théorie mais la mise en œuvre semble difficile. Par ailleurs, les composantes de la niche écologique des espèces autres

que celles associées à la niche bioclimatique doivent aussi être considérées. Par exemple, lors des translocations, la réflexion nécessite d'intégrer les pollinisateurs associés à l'espèce végétale concernée.

Dans la mesure où vouloir gérer l'ensemble des axes de la niche écologique des espèces semble illusoire, une autre approche à considérer est celle du maintien de la capacité des populations naturelles à répondre aux changements environnementaux. Il s'agit alors de conduire des actions de gestion pour conserver les espèces non pas sous leur forme statique mais comme des entités dynamiques capables d'évoluer et de faire face à des changements environnementaux, ce qui passe par le maintien de la diversité génétique dans les populations naturelles, objectif reconnu dans la Convention sur la Diversité Biologique (CDB) 2011-2020.

De manière opérationnelle, le renforcement des populations représente une action de gestion qui combine à la fois un effet immédiat de rescousse démographique, avec l'apport de nouveaux individus réduisant l'effet des événements stochastiques, et un effet plus diffus dans le temps de rescousse génétique avec l'apport d'une diversité génétique, éventuellement nouvelle si l'on combine le renforcement à des mélanges de populations.





CHAPITRE

12

**ENJEUX
PSYCHOSOCIOLOGIQUES**

Coordination : Béatrice JALENQUES-VIGOUROUX, Elsa CAUSSE
et Virginie HUGUES

Rédaction : Karl BERTHELOT, Marie-Julie CATOIR-BRISSON, Elsa CAUSSE,
Sylvain CHABE-FERRET, Andreas ERIKSSON, Guillaume FABUREL, Loriane
FERREIRA, Fabien GIRANDOLA, Mathilde GIRAULT, Béatrice GISCLARD,
Béatrice JALENQUES-VIGOUROUX, Gaëlle JOUANNO, Philippe LE COËNT,
Daniel LEPERCQ, Fabian LEVEQUE, Daniel LUCIANI, Arnaud REYNAUD,
Isabelle RICHARD, Julie SUBERVIE.

Introduction

Béatrice JALENQUES-VIGOUROUX (INSA - LERASS), Elsa CAUSSE (UN - CHROME)

Pour s'adapter aux changements climatiques, ou tenter d'en diminuer la portée, il est de plus en plus évident et nécessaire d'opérer une transformation majeure des modes de vie, en parallèle des progrès techniques pouvant être réalisés dans certains secteurs. De fait, « la » solution technique ne peut prendre place que dans un cadre social adéquat, transformé, modifié, en transition(s), sous peine d'une totale inefficacité, voire même d'effet pervers.

Or, si l'on constate que la préoccupation pour la préservation de l'environnement et des ressources est de plus en plus présente dans le discours public, que l'ensemble de la population se dit préoccupée par les questions climatiques, force est de constater que cela ne se traduit pas systématiquement par des actions concrètes. Dans ce contexte de transition, le concours de plusieurs disciplines spécialistes de la communication et du changement comportemental est nécessaire pour décrire et comprendre ce décalage et permettre de promouvoir des modes de vie favorisant l'adaptation aux changements climatiques tout en étant bien acceptés par les populations.

Ce chapitre est orienté vers l'éclaircissement des ressorts psychologiques à l'origine du passage à l'action chez les individus. En point aveugle, nous noterons donc qu'il aborde assez peu le champ de la communication environnementale proprement dite (communication responsable, récit environnemental, médias et environnement, etc.), même s'il traite de la communication engageante.

Après une première étude sur les ressentis des citoyens face aux « fournaises urbaines », ce chapitre présente d'abord deux contributions montrant l'écart entre volonté d'agir et action. Puis il pointe l'envie chez un public profane de s'emparer d'informations scientifiques de haut niveau, telles que les probabilités, afin d'agir de façon plus informée. Ensuite, plusieurs leviers d'action sont présentés : la place du collectif pour faciliter le changement individuel, la place de l'éducation, la communication engageante et les nudges notamment. Enfin, les dernières contributions concluent sur l'idée que ces recherches nécessitent une pratique scientifique différente, davantage « participative », c'est-à-dire davantage à l'intersection de savoirs profanes et savants.

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Une exposition pour apprendre les bons comportements à adopter en cas d'épisode Cévenol - 30

Alès Agglomération - [En savoir plus](#)

Cette exposition, pilotée par Alès Agglomération, se présente sous forme d'une maquette de bassin versant représentatif des Cévennes et est animée par une vidéo et accompagnée de différents supports d'informations préventives. Tout au long de la vidéo, la mascotte « Châtaigne » guide l'utilisateur pour actionner la maquette : celui-ci voyage alors de la fin de l'été lorsque les niveaux des cours d'eau sont au plus bas jusqu'à la formation d'un épisode cévenol et de ses conséquences (ruissellement, crue torrentielle et inondations pouvant être dévastatrices).

Axée sur les particularités du climat méditerranéen et des inondations en région Occitanie et en particulier dans le Gard, elle développe également le volet gestion de crise avec les différents acteurs et leurs rôles ainsi que les bons comportements à adopter. Cette exposition a vocation à se déplacer au sein des différentes structures présentes sur les 72 communes membres d'Alès Agglomération afin de sensibiliser le plus grand nombre et tout particulièrement les scolaires.



Crédit photo : S. Garcia.

Sentiments critiques et engagements pratiques face aux « fournaies urbaines » - Enquête en période de canicule dans cinq villes du Sud de la France

Guillaume FABUREL (U. Lyon - TRIANGLE), Fabian LEVEQUE (U. Lyon - TRIANGLE), Karl BERTHELOT (EHESS), Mathilde GIRAULT (U. Lyon), Loriane FERREIRA (U. Lyon - TRIANGLE)

Menée pour l'ONG Notre affaire à tous, cette enquête s'est déroulée en juin/juillet 2019, avec des habitant.e.s de deux villes moyennes (Nîmes et Narbonne) et trois métropoles (Marseille, Montpellier, Toulouse). Elle repose sur une démarche qualitative de 130 entretiens, d'une durée moyenne d'une heure. Cette recherche visait à interroger les vécus climatiques en milieu urbain et les engagements écologiques des habitant.e.s interrogé.e.s (**voir chapitre-enjeu Milieux urbanisés**).

Il en ressort tout d'abord que l'impression de « fournaies urbaines » est très largement partagée au sein de la population enquêtée. 56 % affirment que le changement climatique a déjà des effets concrets sur leurs manières de vivre au quotidien : adaptation des horaires de sommeil, concentration des sorties le matin ou le soir, ralentissement des rythmes de vie. Fait plus marquant : ces constats trouvent des relais dans des sensations et impressions de suffocation et d'asphyxie croissants.

En outre, ces ressentis font droit à un sentiment tout aussi marqué d'injustices : des inquiétudes prédominent à l'égard des populations vulnérables (enfants, personnes âgées ou isolées, sans domicile fixe) qui souffrent au quotidien de cette chaleur, mais aussi vis-à-vis des générations futures à qui l'on laisserait des situations écologiques de plus en plus invivables. Pour près de la moitié des habitant.e.s, ce sentiment prévaut à l'endroit des plus démunis.e.s, y compris vis-à-vis des migrants climatiques en provenance des pays pauvres.



Crédit photo : pixabay.com.

En troisième lieu, les causes, explicitement pointées du doigt, sont à trouver du côté des densifications urbaines, de l'hyperconcentration du bâti, de l'artificialisation des sols ainsi que de l'influence touristique. Les arrière-pays et les campagnes sont parés de plusieurs vertus pour les pratiques quotidiennes et les choix résidentiels : un minimum de 30 % des répondant.e.s envisagerait déjà de quitter les grands centres urbains si les conditions d'habitabilité urbaine continuaient à se dégrader.

Par ailleurs, des responsabilités sont pointées, suscitant colères et défiances. Les institutions en charge des affaires publiques, qu'elles soient nationales ou municipales, sont jugées incapables de contrôler ou réguler les grands intérêts du développement économique et de l'aménagement en cause dans les enjeux climatiques. Dès lors, un sentiment d'impuissance prévaut face au constat d'emballement urbain et de dérèglement climatique, à la désaffiliation institutionnelle et aux colères grandissantes.

Toutefois, dernier grand résultat, ces vécus s'imposent comme un opérateur pour engager une réflexion sur les conditions d'habiter, les politiques publiques et les conditions sociales d'existence au regard des dégradations écologiques. Il en découle alors des engagements qui ne passent plus nécessairement par des formes traditionnelles de militance, mais qui se manifestent par des changements ordinaires et discrets. Près de 60 % des enquêté.e.s se déclarent engagé.e.s au quotidien en faveur de l'écologie, depuis une gestion personnelle des déchets jusqu'à des bifurcations dans les trajectoires professionnelles.

En fait, loin de nier les enjeux écologiques ou de privilégier une stratégie des « petits gestes », les habitant.e.s rencontré.e.s construisent progressivement une critique existentielle, dans laquelle leurs propres conditions de vie deviennent supports pour une réflexion politique et écologique élargie. Et si un tiers des répondants appelle à une transformation profonde et radicale des sociétés actuelles (contre les modes de vie imposés et les intérêts économiques et politiques les produisant), l'horizon plus désirable des devenirs terrestres passerait par une plus grande prise d'autonomie écologique et politique. Auto-limitation et déconsommation font partie des solutions prônées par les personnes enquêtées.

Cette enquête réalisée sur des populations citadines d'Occitanie permet de mieux comprendre les vécus et ressentis face aux changements climatiques ; elle révèle aussi des formes d'engagements, allant de changements marginaux à des engagements plus militants et radicaux. Mais quels sont les mécanismes qui freinent ou encouragent le changement vers de nouveaux comportements ? Quelques éléments d'analyse des freins et des leviers sont proposés ci-dessous.

Constats et questions de départ, d'où part-on pour agir ?

Contrairement à ce que l'on pourrait imaginer, il ne suffit pas d'être convaincu qu'un changement soit nécessaire pour qu'il soit mis en acte. Ainsi, déclarer vouloir agir et agir semblent deux choses bien distinctes, comme l'illustrent précisément les textes ci-dessous. Plusieurs phénomènes expliquent cela et leur compréhension est essentielle pour anticiper certaines actions de communication par la suite, comme la pédagogie autour de la notion d'incertitude par exemple.

Perceptions des changements climatiques, rupture des habitudes et acceptation du changement

Isabelle RICHARD (*Environnons*)

Pourquoi un tel changement de comportement et de perception est-il difficile ?

Le changement de comportement s'intègre dans la problématique de la transition écologique et nécessite de revenir, pour comprendre sa dynamique, sur la question des habitudes et la perception des modes de vie parfois en inadéquation avec la sobriété nécessaire. Percevoir tant d'un point de vue physique que psychique les conséquences du changement climatique est une tâche difficile pour l'ensemble des individus. La difficulté cognitive à percevoir le changement climatique peut s'expliquer, entre autre, par les caractéristiques des phénomènes environnementaux en eux-mêmes qui peuvent être, perceptibles ou non, immédiats ou différés dans le temps, réversibles ou irréversibles, ou encore contrôlables ou incontrôlables (Moser, 1992).

De la même façon, tendre vers un mode de vie plus respectueux de l'environnement implique de transiter par plusieurs étapes en termes d'attitude et de comportement : c'est d'abord être sensible à l'environnement et reconnaître les conséquences négatives de certaines de nos activités sur l'environnement à court, moyen et long

terme, puis prendre du temps pour réfléchir à son mode de vie et trouver des solutions faciles et adaptées à sa vie quotidienne, changer ses pratiques et enfin agir et pérenniser son comportement en prenant en compte les impératifs d'emploi du temps. Considérant l'ensemble de ces étapes, changer ses comportements est une action souvent difficile pour les ménages qui, pris dans une routine, n'auraient pas le temps ni l'opportunité de re-questionner leur façon d'agir. Ainsi, la force de l'habitude permet d'expliquer la résistance des usagers aux injonctions du changement (Verplanken et al., 1997) rendant ainsi possible des changements dans des moments décisifs, de rupture dans le cycle de vie (déménagement, naissance d'un enfant, séparation, changement d'emploi, etc.).

Enfin, la façon dont le changement est mis en place ou requis donnerait lieu à des pensées en lien avec le sentiment de justice ou d'injustice particulièrement important dans l'acceptation du changement (Steiner et Rolland, 2006). Ainsi, plus l'individu perçoit de l'injustice dans la façon d'opérer le changement, plus il va être enclin à le rejeter. Il est donc nécessaire d'installer des politiques cohérentes allant toutes dans le sens d'une réduction de l'empreinte carbone en général.

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Appuyer les acteurs du territoire dans la mise en place de solutions locales d'adaptation (ECT'Adapt) - 66

TRAM'66 - [En savoir plus](#)

Le projet ECT'Adapt, porté par le Conseil départemental des Pyrénées-Orientales, sans minimiser l'importance des actions en lien avec l'atténuation, a pour registre d'action l'adaptation au changement climatique.

L'enjeu est de contribuer à l'adaptation de l'espace catalan transfrontalier aux effets attendus du changement climatique, via différents objectifs :

- analyser la vulnérabilité du territoire aux impacts climatiques ;
- aider les collectivités dans l'élaboration de plans locaux d'adaptation pour faciliter le passage à l'action ;
- sensibiliser la population et les acteurs.

L'association TRAM'66 agit sur ce dernier volet en proposant des animations grand public ou à destination des plus jeunes grâce aux outils pédagogiques développés (un escape game et un jeu des 7 familles par exemple). Sensibiliser mais surtout passer à l'action en mettant en place des solutions d'adaptation dans les communes, les établissements scolaires, etc. sont les finalités de ce projet.



Crédit photo : TRAM'66

Des écarts constatés entre intentions d'agir et actions concrètes

Andreas ERIKSSON (UPS - LERASS)

Si l'adoption de comportements pro-environnementaux par les concitoyens fait l'objet d'un intérêt accru dans les institutions publiques pour limiter les émissions de CO₂ liées aux postes de consommation des ménages, elle est une question particulièrement investie, non seulement par les recherches en psychologie sociale, mais aussi en communication environnementale. Ces deux disciplines soulignent un écart entre une préoccupation environnementale croissante et une stagnation, voire une baisse, des actions en faveur de l'environnement. D'une part, les déterminants psychosociaux des comportements écologiquement responsables comme les écogestes (p. ex. tri, réduction de la consommation d'énergie et d'eau, les achats responsables, la mobilité douce, régime végétarien) ont été bien identifiés. D'autre part, les différentes études de stratégies en communication environnementale ont pu mettre en lumière les leviers qui favorisent l'engagement dans ces pratiques.

Depuis une vingtaine d'années, les psychosociologues relèvent, aussi bien en France qu'à l'international, un « gouffre vert » entre des fortes intentions d'agir et une faible adoption de ces actions en faveur du climat (figure 12.1). Ces études identifient les connaissances des enjeux climatiques, les informations concernant les écogestes à mettre en place et un positionnement (attitude) favorable pour agir en faveur du climat comme des éléments indispensables mais insuffisants pour passer à l'action.

En effet, si en France la majorité des citoyens a une bonne compréhension des comportements qu'elle peut adopter pour limiter les émissions de CO₂, et a une réelle

préoccupation climatique, nous sommes plusieurs à observer quatre freins principaux expliquant ce gouffre :

- Premièrement, bien que la fréquence et l'intensité des événements climatiques soit en hausse, le réchauffement climatique s'avère encore être 1) un événement psychologiquement distant dans ses dimensions temporelle (horizon 2100) et spatiale (fontes des banquises), et n'engage pas les citoyens à agir « ici et maintenant » dans leur quotidien.
- Deuxièmement, face à l'ampleur et la complexité des enjeux climatiques, les Français ont 2) un sentiment d'impuissance et une faible perception de leur capacité à agir pour mitiger ces événements d'ordre global.
- Troisièmement, les différents scénarios climatiques produits par les instances scientifiques (p. ex. GIEC) sont de plus en plus alarmistes, et l'amplification par les médias de masse suscite 3) une anxiété climatique croissante, c'est-à-dire une peur chronique de l'emballement climatique qui s'avère être potentiellement paralysante lorsque la perception du danger de la catastrophe est démesurément accentuée (voir chapitre-enjeu Santé).
- Finalement, s'ajoute à ces constats, une observation générale 4) de manque d'engagement sensible et sensoriel avec la nature qui inhibe une réelle sensibilité et la construction d'une identité environnementale propices aux comportements écologiques.

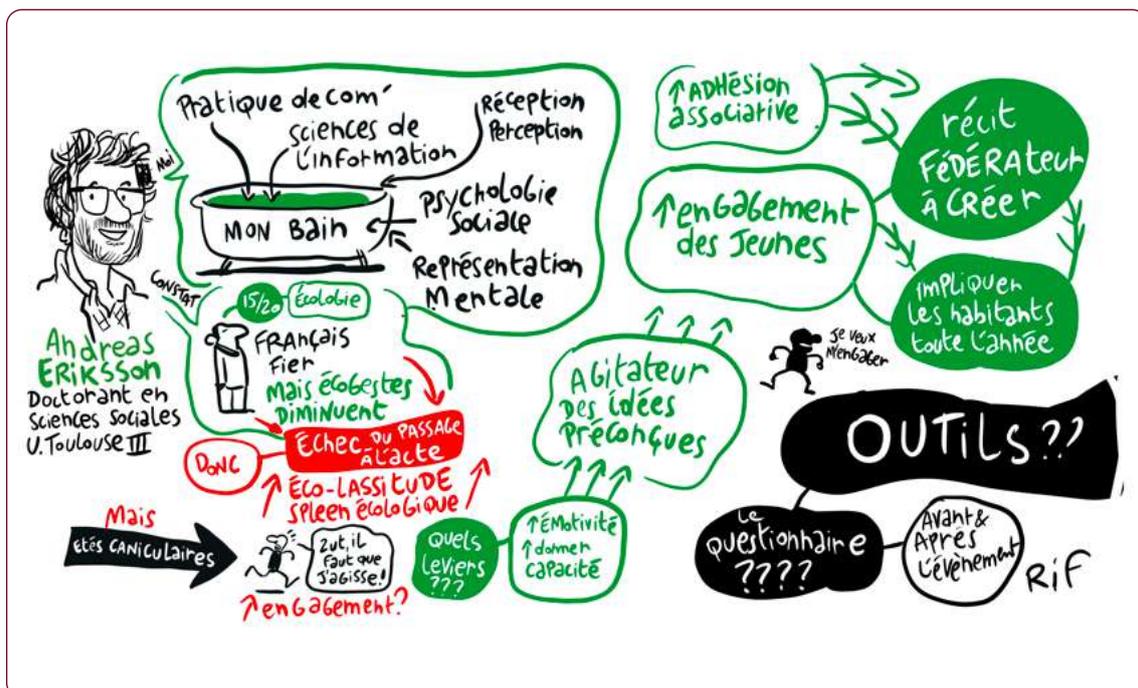


Figure 12.1. L'engagement écologique. (Source : Rif, 2020).

Acceptation de l'incertitude climatique grâce aux prévisions probabilistes

Gaëlle JOUANNO (UPS - LERASS)

Les prévisions météorologiques sont probablement une des prévisions scientifiques les plus visibles et les plus utilisées par les publics non spécialisés. Ces derniers possèdent une expérience vécue importante des prévisions et des conditions météorologiques (Morss et al., 2008). Aujourd'hui, les évolutions techniques et mathématiques ont conduit la météorologie à développer des prévisions plus précises, les prévisions probabilistes qui quantifient l'incertitude des phénomènes météorologiques à venir. Cette quantification s'exprime à l'aide de données chiffrées.

Par cette expérience quotidienne, la communication des prévisions probabilistes météorologiques pourrait-elle contribuer à la prise en compte des changements climatiques et favoriser la transition écologique ? En 2020, la réalisation d'une étude sur les représentations des prévisions probabilistes auprès de publics non spécialisés (Jouanno, 2020) nous permet de dégager des pistes intéressantes sur cette question (figure 12.2). Le terrain d'enquête est Toulouse, 4^e ville de France avec 471 941 habitants et 1530 au kilomètre carré, ce qui fait de cette ville un espace à faible densité comparé aux grandes villes. La moyenne d'âge de la population est de 34 ans, elle compte une population étudiante importante (INSEE, 2021). L'enquête réalisée correspond à un échantillon de 75 participants, toutes méthodes confondues (questionnaire, focus group, entretiens).

Tout d'abord, les résultats de cette étude montrent un intérêt fort des publics non spécialisés pour les prévisions probabilistes, ce qui rejoint les résultats d'enquête de Murphy (Murphy, 1980). Les prévisions probabilistes se présentent comme un outil d'aide à la décision pour la majorité des enquêtés. Ces derniers établissent leur propre seuil influençant leur décision selon leurs expériences vécues et leurs attentes. Certains prendront la décision de se déplacer en vélo après une consultation à 20 % et d'autres à 50 % de précipitation. Le niveau de compétence, les attentes des utilisateurs et le format du support peuvent toutefois constituer des freins. Un utilisateur grand public recherche une prévision claire, précise et instantanée.

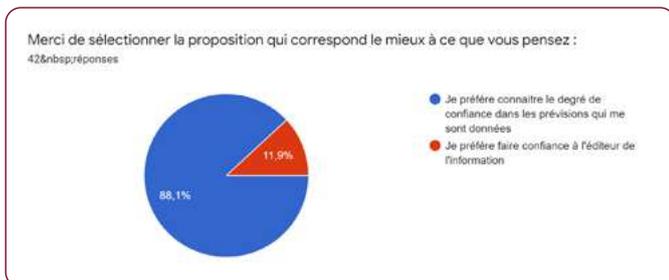


Figure 12.2. Comparaison des préférences du panel d'interrogés entre « connaître le degré de confiance dans les prévisions qui me sont données » et « faire confiance à l'éditeur de l'information », extrait de l'étude « La communication des prévisions probabilistes ». (Source : Jouanno, 2020 pour Météo France)

Cette prévision, l'utilisateur doit être capable de la visualiser dans sa totalité (intensité, temps, donnée), même pendant une courte consultation (1-2 min). L'intérêt de cette étude est de prouver que l'introduction de l'incertitude au sein des prévisions probabilistes permettra d'instaurer une meilleure confiance dans les prévisions. Car l'incertitude est inhérente aux prévisions météorologiques. Quand les prévisionnistes cherchent à évincer cette incertitude, on a pu vérifier que la communication de fausses certitudes provoque une aversion aux prévisions météorologiques chez certains enquêtés. A long terme, l'accroissement de l'information de l'incertitude des prévisions au quotidien pourrait donc être vu comme un outil pédagogique pour l'information climatique. Faire admettre petit à petit la dimension d'incertitude au sein des prévisions météorologiques quotidiennes auprès du grand public permet de le rendre plus à l'aise avec ce type de raisonnement.

Rendre ces données chiffrées accessibles et installées dans le quotidien pourrait favoriser un changement face à l'incertitude et à sa gestion dans la prise de décision chez les publics non spécialisés. Pour aller plus loin, privilégier le rapport au monde et à la nature de chacun en lien avec une dimension écologique et les consultations météorologiques, par le biais des domaines de consultation comme la pratique sportive, la gestion quotidienne, les déplacements ou encore le jardinage etc., peut constituer une ouverture communicationnelle vers de nouvelles représentations. La dimension spatiale imposée aux conditions météorologiques selon les territoires peut renforcer un discours et des représentations de la transition écologique au plus près de la réalité locale. Cette médiation scientifique invite ses utilisateurs à visualiser différents aspects de la transition écologique de façon cohérente (consommation, usage, solidarité) et lors de leur prise de décision (consultation et anticipation des conditions météorologiques). Cela peut constituer une forme de communication peu coûteuse et peu culpabilisante vers et pour une appropriation progressive en faveur de nouvelles représentations et pratiques (Libaert, 2010).

En conclusion, la communication quotidienne de l'incertitude peut contribuer à la « conscientisation » des publics non spécialisés et permettre un dépassement des limites de la communication des changements climatiques (Juanals, 2019). Même si les prévisions météorologiques ne se confondent pas avec les projections de changements climatiques par leur niveau temporel et leur modèle numérique de calcul, la consultation des prévisions probabilistes, comprenant la quantification de l'incertitude d'un phénomène, en vue d'une prise de décision quotidienne, permet d'appréhender l'incertitude climatique en la rendant plus gérable et acceptable au quotidien.

Cette première partie fait le constat d'un certain nombre de freins au plan cognitif qui bloquent le passage à l'action. Ainsi, nos habitudes et nos perceptions peuvent complexifier la mise en œuvre de la transition. La suite du chapitre développe des actions menées et des leviers qui permettent de dépasser ces blocages, d'engager les parties prenantes et se tourner vers une action individuelle et/ou collective.

Quels moyens pour passer de l'individuel au collectif ? Communication, changements structurels et engagements collectifs

Andreas ERIKSSON (UPS - LERASS)

La plupart des études en communication environnementale recommandent d'augmenter la visibilité et la vivacité (le degré avec lequel les messages suscitent 1) un intérêt émotionnel ; 2) un aspect concret susceptible de provoquer des images mentales, et 3) une grande proximité sur le plan sensoriel, temporel ou spatial, (Nisbett et Ross, 1980) des changements climatiques en cours dans des messages plus territorialement ciblés et en proposant des solutions concrètes et adaptées aux problèmes locaux que ces changements globaux génèrent. Il s'agit de surmonter la peur suscitée chez les individus en montrant que les institutions agissent à la hauteur des enjeux et soutiennent les initiatives locales à l'œuvre qui fonctionnent et réunissent des citoyens collectivement. À rebours des prescriptions individuelles à changer de comportement, il s'agit de donner à voir l'efficacité des projets collectifs et ainsi d'augmenter la perception et le sentiment de capacité à agir des individus.

La communication engageante propose justement d'impliquer les citoyens dans des actions publiques et libres de choix, afin de susciter des nouvelles expériences et des engagements dans des dynamiques de groupe (figure 12.3). L'objectif est donc de peser sur les actions pour changer les idées. Au lieu d'un public « passif » en manque d'information et de connaissances, la communication engageante propose d'agir « ici et maintenant » avec des publics « actifs » ayant un rôle et statut de décideur dans le cours des actions au quotidien. Ce paradigme montre combien nous sommes plutôt engagés par nos actes et des situations externes, sociales et communicationnelles. La communication engageante vise à modifier les croyances et les représentations initiales des publics en les invitant à réaliser un petit acte qui peut être source d'une nouvelle expérience et un changement d'habitude (Bernard, 2018). Notons que ce changement en acte doit être libre de choix et s'inscrit dans le temps long lorsqu'il est collectif.

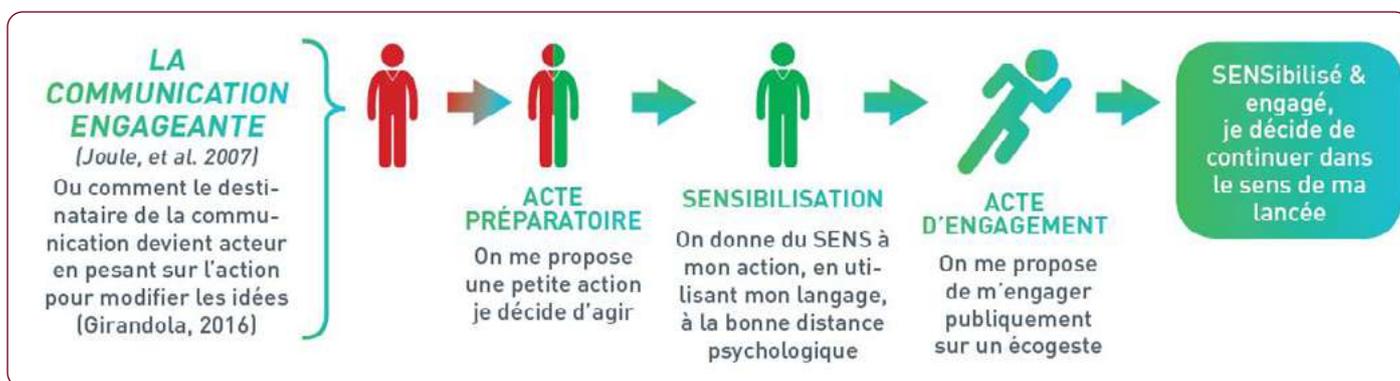


Figure 12.3. La communication engageante.
(Source : Eriksson et Luciani, 2017)

Par exemple, le projet de recherche-action **URCPIE Midi-Pyrénées (2019)** intitulé « S'engager dans la Transition Écologique » présente des retours d'expériences de la communication engageante pour engager des groupes d'habitants dans leurs lieux de vie et des groupes de salariés sur des écocostes dans des lieux de travail de 28 entreprises de la Région Midi-Pyrénées.

Ces projets communs font sens au niveau des lieux de vie, des quartiers, des communes, des écoles aux universités et des entreprises. Ils peuvent être initiés par les collectivités locales et permettent de pérenniser l'investissement des citoyens par des engagements qui s'au-

to-alimentent dans la dynamique portée par les groupes locaux. À l'appui, les professionnels de l'éducation à l'environnement ont les compétences et les ressources créatives afin d'entraîner les citoyens à redécouvrir la nature proche et ordinaire et à développer dès l'enfance des sensibilités et des identités environnementales et donc des attachements aux lieux de vie.

L'art de la sensibilisation fait bien appel aux sens, au sensible et à donner un sens plus engageant aux actions que nous pouvons mettre en place localement et collectivement dans et avec la nature.

En guise de conclusion, nous aimerions souligner que les écogestes individuels, bien que nécessaires, ne permettent qu'une baisse de 5 à 25 % de l'empreinte carbone personnelle compatible avec l'Accord de Paris. Comme le souligne l'étude de Carbone 4 pilotée par Jean Marc Jancovici (Carbone 4, 2019), les 3/4 restants dépendent de la décarbonation systémique de l'industrie, l'agriculture, le transport, de l'énergie et des services publics. L'étude conclut qu'il « est donc vain, et même dangereusement contre-productif, de prétendre résoudre la question climatique en faisant reposer l'exclusivité de l'action sur les seuls individus ». Si le changement de comportement individuel reste important à accompagner, il s'agirait donc de redoubler d'effort pour un engagement collectif fort, à la croisée de ces multiples secteurs dans lesquels nous sommes tous reliés, inter-dépendamment, comme acteurs du changement.

L'enseignement majeur de ces constats est au moins de deux ordres :

1) La « prise de conscience climatique » est globalement acquise en France mais ne se traduit pas dans des changements individuels de comportements rapides et efficaces. Au-delà des freins psychosociaux pour passer à l'acte, les verrous de l'engagement collectif sont institutionnels et sociétaux, et nécessitent des changements structurels en commençant par la formation systémique des citoyens pour faire face aux défis de notre siècle.

Et l'enjeu est de taille selon le rapport du climatologue Jean Jouzel (Rapport du groupe de travail « Enseigner la transition écologique dans le supérieur », 2020) car « la transition écologique n'est enseignée que de façon marginale, quand elle l'est », alors que celle-ci « mérite un effort, depuis le primaire jusqu'à la fin du lycée, en direction de tous les élèves » en y associant les parties-prenantes hors-établissements tels que les associations, les entreprises et les collectivités (Jouzel et Abadie, 2020).

2) Si l'éducation reste essentielle, l'enjeu climatique n'est plus tant de persuader les publics par des campagnes massives et coûteuses pour changer des comportements individuels, mais de savoir comment engager collectivement. Autrement dit, il s'agit d'une question d'engagement et de communication climatique qui se décline d'une façon cohérente à l'échelle territoriale, dans une mosaïque locale de transitions écologiques et énergétiques. Des expérimentations collectives et innovantes sont déjà « passées à l'acte », dans lesquelles la communication engageante peut investir les dynamiques de groupe pour engager les citoyens d'une manière plus pérenne. Au-delà des écogestes, l'engagement dans des projets communs et l'encapacitement à l'action (néologisme renvoyant au fait de « donner la capacité de ») avec et par les pairs, véhiculent des significations et des expériences du changement plus durables, car collectivement partagées sur le temps long.

Les « nudges », des leviers à approfondir

Sylvain CHABE-FERRET (UTC - TSE), Philippe LE COËNT (BRGM), Arnaud REYNAUD (UTC - TSE), Julie SUBERVIE (INRAE - CEE-M), Daniel LEPERCQ (CACG)

Avec le changement climatique, trouver des moyens d'économiser l'eau est un enjeu crucial (**voir chapitre-enjeu Eau**). L'agriculture est le principal utilisateur d'eau en Europe, avec plus de 50 % des prélèvements totaux (**voir chapitre-enjeu Agrosystèmes**). Alors que les agronomes essaient de rendre les cultures moins dépendantes à l'eau, ou de rendre l'utilisation de l'eau plus efficace en améliorant le matériel et les techniques, et que les économistes suggèrent de taxer l'utilisation d'eau, dans ce projet, nous avons tenté de réduire l'utilisation d'eau par les agriculteurs en utilisant des leviers psychologiques, ou nudges (Chabé-Ferret et al., 2020), « petits éléments présents dans l'environnement qui attirent notre attention et qui modifient notre comportement » (Thaler, 2018).

Les nudges sont apparus dans les dernières années comme des compléments intéressants et peu coûteux aux outils comme la réglementation, la taxation ou la subvention. Initialement développés pour inciter les ménages à épargner ou à adopter une alimentation plus équilibrée, les nudges ont été plus récemment employés pour tenter de leur faire adopter des comportements

plus écologiques. Le nudge que nous avons utilisé est appelé « nudge de comparaison sociale ». Il consiste à fournir aux agriculteurs une information sur leur propre consommation d'eau comparée à la consommation moyenne de leurs voisins. Ce type de nudge a déjà fait ses preuves, notamment aux Etats-Unis, pour réduire la consommation d'eau et d'électricité des ménages. En revanche, il n'a jamais été testé jusqu'ici pour tenter de réduire la consommation d'eau des agriculteurs.

Notre étude a été menée auprès d'agriculteurs localisés sur le système Neste, une zone alimentée par un ensemble de rivières rechargées artificiellement par des réservoirs localisés dans les Pyrénées, et où l'agriculture est fortement dépendante de l'irrigation. Les agriculteurs du système Neste disposent d'un quota d'eau d'irrigation annuel géré par la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG). Depuis quelques années, la CACG a commencé à équiper ses clients de compteurs communicants qui permettent d'obtenir un relevé hebdomadaire de leur consommation d'eau.

En collaboration avec la CACG, nous avons envoyé chaque semaine à 99 agriculteurs disposant de compteurs communicants un SMS les informant de leur consommation et de celle de leurs voisins. En pratique, le texte du SMS était le suivant :

« Bonjour Mr X. Economiser l'eau est important pour votre bassin versant. Merci de continuer à optimiser votre irrigation.

Au 12/09, vous avez consommé 45 % de votre quota. Félicitations ! Les agriculteurs irrigants de votre bassin ont utilisé en moyenne 50 % de leur quota. »

Pour évaluer l'effet de notre nudge, nous avons choisi les 99 agriculteurs nudgés au hasard parmi 200 agriculteurs équipés de compteurs communicants. Les 101 agriculteurs non sélectionnés ont été placés dans un groupe de contrôle et ont reçu un message hebdomadaire les invitant simplement à continuer leur irrigation, sans information sur leur consommation ni celle de leur voisins. Cette approche de tirage au sort des agriculteurs nudgés s'inspire de la recherche médicale où l'essai randomisé et contrôlé est la méthode de référence pour évaluer l'efficacité d'un traitement. La sélection au hasard des membres des deux groupes permet de garantir que leur composition est identique, et qu'ils auraient eu, en moyenne, la même consommation d'eau s'ils n'avaient reçu aucun nudge.

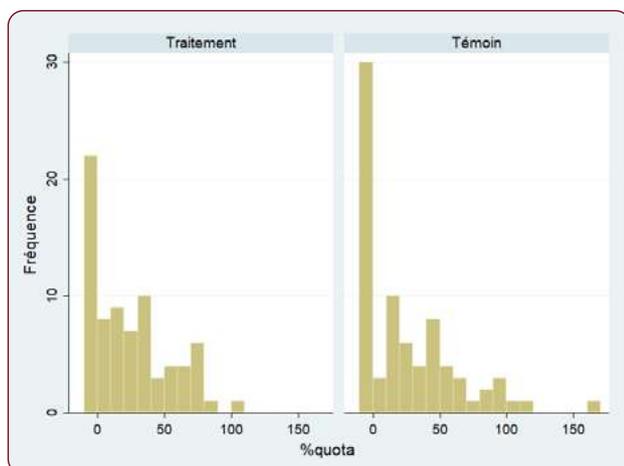


Figure 12.4. Comparaison du nombre d'agriculteurs par tranche de consommation totale d'eau en fin de saison au 12 septembre. (Source : S. Chabe-Ferret, 2019)

La **figure 12.4** présente le nombre d'agriculteurs par tranche de consommation totale d'eau en fin de saison (au 12 septembre) en pourcentage du quota, dans le groupe nudgé (Treated) et dans le groupe non nudgé (Control). Le nombre d'agriculteurs consommant plus de 80 % de leur quota est plus faible dans le groupe nudgé que dans le groupe non nudgé, ce qui montre que notre nudge a été efficace pour réduire les consommations les plus élevées.

Malheureusement, la proportion d'agriculteurs ne consommant pas d'eau du tout est plus élevée dans le groupe n'ayant pas reçu le nudge, ce qui suggère que notre intervention a encouragé les agriculteurs qui avaient choisi de ne pas irriguer à consommer de l'eau, ce que l'on appelle un effet boomerang. Au final, notre nudge a eu un effet faible sur la consommation totale d'eau, l'effet boomerang compensant les économies d'eau réalisées sur les plus gros consommateurs. Nos résultats montrent que les nudges, associés à des technologies nouvelles comme les compteurs communicants, ont le potentiel d'amener les agriculteurs à économiser l'eau. Leur conception doit néanmoins être affinée pour réduire les effets boomerang et améliorer la qualité du message envoyé aux agriculteurs, en le combinant par exemple avec des préconisations techniques adaptées aux prévisions météo et aux objectifs de rendement.

LES ACTEURS D'OCCITANIE SE MOBILISENT

Sensibiliser dès le plus jeune âge pour économiser l'eau et l'énergie (Watty à l'école) - 82

CC Grand Sud Tarn-et-Garonne - [En savoir plus](#)

La Communauté de Communes Grand Sud Tarn-et-Garonne, dans le cadre de son Plan Climat Air Énergie Territorial (PCAET), a souhaité sensibiliser les élèves de 22 classes aux économies d'énergie et d'eau. Les parents ont été concernés par effet rebond, par le biais des écogestes appris à l'école. 548 élèves des écoles de Bouillac, Finhan, Larramet à Montech, Montbartier et Orgueil ont participé à 3 ateliers sur l'énergie et l'eau. Près de 500 kits économes en eau ont été distribués aux familles pour réaliser des économies d'eau et d'énergie.

Pour stimuler les élèves, les enseignants et les familles, le concours artistique WATTY leur proposait de créer un support photo, vidéo ou textuel pour illustrer les écogestes. Une élève de l'école de Montbartier a gagné un prix au niveau

régional, a reçu un jeu de société « famille zéro déchets », et est devenue citoyenne d'honneur de Montbartier, de quoi montrer l'exemple aux autres enfants et aux adultes. Le CPIE Quercy Garonne a assuré ces animations dans le cadre d'un partenariat avec Eco 2 Co2 qui déploie ce programme CEE au niveau national.



Crédit photo : CC Grand Sud Tarn-et-Garonne

Des leviers de passage à l'action : communication engageante & nudge pour réduire le gaspillage alimentaire

Fabien GIRANDOLA (AIX-Marseille U. - LPS), Daniel LUCIANI (ICOM 21)

Dans le cadre du Plan Climat Air Énergie Territorial et du Programme Local de Prévention des Déchets, Toulouse Métropole a décidé d'engager une action visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) liées au gaspillage alimentaire en encourageant les restaurateurs à promouvoir dans leurs établissements le doggy bag, appelé plus joliment à la française le « Gourmet Bag ».

L'Agence ICOM 21 et le Laboratoire de Psychologie Sociale d'Aix-Marseille Université ont été sollicités pour mener une expérimentation de juin à juillet 2015 afin de tester la pertinence et l'efficacité d'un dispositif de communication engageante associé aux techniques des nudges afin de faciliter la diffusion et l'acceptation du doggy bag tant chez les professionnels que les particuliers. L'étude a été déployée avec le concours de huit restaurateurs membres de l'UMIH 31 (Union des Métiers et des Industries Hôtelières de la Haute-Garonne), de la DRAAF Midi-Pyrénées et de l'ADEME Midi-Pyrénées.

En France, bien que le doggy bag ne soit pas une pratique courante, 75 % des consommateurs se disent prêts à l'utiliser (enquête réalisée par la DRAAF Rhône-Alpes, 2014). Nos habitudes font que nous éprouvons des réticences à demander au restaurateur de pouvoir emporter les restes d'un plat. Pourtant, dans les pays anglo-saxons, cela se pratique depuis des années. Le but de l'étude réalisée était donc de tester concrètement une campagne de communication engageante dans les restaurants en s'appuyant sur des techniques qui favorisent le changement de comportement des consommateurs au profit d'une pratique éco-citoyenne.

Le gaspillage alimentaire est un axe fort de la politique coordonnée par le Ministère en charge de l'agriculture et de l'alimentation. L'objectif est d'arriver à réduire en France ce gaspillage alimentaire dans les foyers et au niveau des opérateurs de la filière. Les chiffres montrent que 90 millions de tonnes/an de denrées alimentaires sont gaspillées dans l'Union européenne. Au niveau national et de Toulouse Métropole c'est 65 kg par habitant de denrées alimentaires gaspillées dont 7 kg directement jetés emballés.

Dans le secteur de la restauration, on trouve 14 % de gaspillage alimentaire en restauration traditionnelle et le gaspillage s'élève à 230 g / personne / repas. Selon une étude du WRAP (WRAP, 2008), chaque tonne de nourriture jetée serait responsable de 4,5 tonnes de CO₂. Une étude de l'ADEME évalue à 15,3 millions de tonnes équivalent CO₂ (Mteq) l'impact carbone de ces pertes et gaspillages. Cela correspond à 3 % de l'ensemble des émissions de l'activité nationale (les émissions de la France sont de 491 Mteq CO₂, format inventaire CITEPA, données 2013).

Le gaspillage alimentaire est donc bien un enjeu pour lutter contre les dérèglements climatiques.

L'étude, basée sur le principe de la communication engageante, s'est déroulée sur 4 semaines. La première semaine consistait en un test à blanc sans protocole ni dispositif de communication engageante (phase 1) : on note tout simplement dans les restaurants le nombre de repas non terminés et le nombre de gourmet bag distribués. Les trois semaines suivantes (phase 2), nous avons déployé le protocole de communication engageante sur 8 555 clients comptabilisés.

Avec le principe de la communication engageante, il ne s'agit pas de diffuser seulement une information à visée persuasive mais de suggérer, en plus, aux clients d'agir en réalisant de petits actes préparatoires engageants qui vont les prédisposer à en accepter de plus coûteux (Girandola & Fointiat, 2016). Ainsi, nous avons imaginé un dispositif de communication engageante se déroulant de la manière suivante : l'opération Gourmet Bag était annoncée d'une manière très visible sur la porte du restaurant par une affiche. Ensuite, les serveurs.es devaient adopter tou.te.s le même discours en informant les client.es qu'un Gourmet Bag était réservé pour eux/elles quoi qu'il arrive. C'est ce que l'on appelle l'option par défaut dans la technique du nudge : le gourmet bag est proposé par défaut. Cela permet de limiter la gêne occasionnée par sa demande.

Un petit chevalet en carton annonçant cette opération était disposé sur la table à laquelle les client.es prenaient place. Sur le chevalet, nous avons mobilisé le principe de la haute identification à l'action : adopter le Gourmet bag c'est contribuer à lutter contre le gaspillage alimentaire. On proposait ensuite aux client.es de répondre à un questionnaire de table sur leurs opinions envers le gourmet bag et le gaspillage alimentaire de manière générale. Ce comportement, accepté en toute liberté, est considéré comme un acte préparatoire engageant. Si à la fin du repas le client n'avait pas terminé son repas, un Gourmet Bag lui était proposé en l'informant que beaucoup l'ont déjà adopté. Cette technique met en jeu la norme sociale. Il est ensuite remercié pour son action.

Sur 1018 questionnaires remplis, 76 % des répondants évaluent la lutte contre le gaspillage alimentaire comme tout à fait importante, 61 % considèrent le Gourmet bag comme tout à fait utile, 60 % indiquent avoir la possibilité de stocker leur Gourmet bag. Nous avons comparé le taux d'acceptation entre la phase 1 (sans communication particulière) et la phase 2 (avec communication engageante).

Les résultats montrent que le nombre de Gourmet Bag distribués augmente significativement entre les phases 1 et 2 : de 17 % d'acceptation (13/77) pour la phase 1 à 38 % d'acceptation (70/184) pour la phase 2 soit 21 % de plus (5 fois plus) de Gourmet Bag distribués. Les résultats attestent de la réussite de l'étude.

La communication engageante déployée pendant l'opération augmente significativement le nombre de Gourmet bag distribués. Ainsi, l'application et la généralisation de la procédure et pratique de la communication engageante dans les restaurants partenaires peut grandement contribuer à la réduction du gaspillage alimentaire.

Prise de conscience et communication valorisante

Isabelle RICHARD (*Environnons*)

Quelles stratégies mettre en place pour favoriser des modes de vie plus écologiques ?

La théorie de la dissonance cognitive, bien qu'étant un concept ancien ([Festinger, 1957](#)) en psychologie sociale, est toujours d'actualité. Cette théorie nous démontre qu'être d'accord avec une idée ne signifie pas agir pour modifier la situation et mettre en œuvre le comportement. Ainsi, les intentions ne sont pas toujours suivies d'actes. Nous pensons néanmoins que quelques éléments peuvent permettre d'accélérer ce changement.

• Ne pas attendre de solutions clés en main mais plutôt parier sur une imbrication des savoirs

Les psychosociologues sont souvent interpellés pour répondre à une problématique du changement de comportement dans divers secteurs de la transition écologique. Régulièrement les attentes sont fortes à ce sujet qui requiert une rapidité d'exécution qui n'est pas cohérente avec le processus, plus long, du changement des pratiques. Si parfois nous avons l'impression que cela ne va pas assez vite, il faut se rassurer sur le fait que plus le changement s'opère en transition, s'installe dans le temps, plus il s'ancre dans les pratiques, les habitudes et les valeurs de l'individu.

La théorie de l'autodétermination de Deci et Ryan ([Deci et Ryan, 2002](#)) nous apprend à ce titre qu'il est nécessaire d'observer chez les individus une motivation intrinsèque à faire un comportement si l'on veut qu'il soit pérenne dans le temps, c'est à dire une motivation qui vient de lui, une motivation qui porte sur ses valeurs, sur ce en quoi il croit. Afin de tendre vers cette motivation, il est nécessaire que chaque comportement de protection de l'environnement effectué par l'individu soit conscientisé.

Le nudge (façon d'influencer sans contrainte en modifiant les aménagements, les conditions autour de l'individu) ou encore la communication engageante (engager les individus en lui faisant réaliser des actions) ont montré leur efficacité pour changer les comportements sur le court terme. Cependant, on s'aperçoit vite que ces changements ne sont pas pérennes car non conscientisés par l'individu, qui, dès qu'il en aura l'occasion ou que la situation changera, reviendra à la situation initiale.

En effet, ces deux dernières méthodes ne permettent pas l'intériorisation des valeurs environnementales des individus car elles ne donnent pas le temps de la réflexion, de l'apprentissage et de l'internalisation des changements de comportements, qui sont alors induits par l'extérieur (motivation extrinsèque).

Ainsi, ces techniques seraient davantage utiles, par interjection, dans des méthodologies centrées sur des schémas de changement plus long tels que le permettent les modèles en étape du changement (par exemple, le modèle RUBICON de Gollwitzer ou le modèle transthéorique de Prochaska et DiClemente). Ces modèles considèrent le changement comme un processus comportant plusieurs phases allant de l'inaction totale, à la conscience du problème, à la planification des actions à réaliser pour le solutionner, à la mise en place des actions concrètes et à leur pérennisation. Comprendre dans quelle phase se situe le.s individu.s dont on veut faire évoluer le comportement permet de mieux cibler la communication et les arguments à lui transmettre et permet également de faciliter le passage à l'action par des aménagements plus structurels dont il aurait besoin pour changer.

• Communiquer autrement – changer d'objet de communication

Également, il nous apparaît important, pour faire évoluer les comportements, de réinventer une autre forme de communication basée sur les notions de bien-être et de santé de l'individu plutôt que sur des critères susceptibles de le culpabiliser ou de lui faire peur. Ainsi, il pourrait être intéressant de créer un récit du collectif sur les modes de vie, de travailler les communications autour d'une norme sociale valorisante plutôt que sur un ton réprobateur mais aussi d'aborder la problématique avec un cadrage positif de l'information plutôt que négatif.

Enfin, changer les comportements de consommation implique en amont d'aider les individus à se projeter dans le moyen / long terme car nous réagissons tous aux urgences et nous n'avons pas le temps de penser la pérennité et la valeur à long terme des actions. Il conviendrait donc de penser cette façon de communiquer dans les projets de transition écologique.

Favoriser les approches de recherche action inclusive

Isabelle RICHARD (*Environnons*)

Pour changer les comportements et développer plus largement les actions en faveur de la transition énergétique, il est nécessaire de faire participer, collaborer, l'ensemble des parties prenantes, à savoir les personnes qui pensent, font, et utilisent les espaces de vie qu'ils soient naturels ou bâtis ou encore qu'ils favorisent les interactions sociales dont nous avons, aujourd'hui plus qu'hier, véritablement besoin.

Pour cela il devient urgent de lier systématiquement dans les projets de transition écologique, qu'ils soient orientés recherche ou plus opérationnels, des chercheurs/experts, des agents de collectivité, des décideurs, et des parties civiles (habitants, usagers, etc.) afin de mettre en œuvre directement, et au sein d'un même projet, les résultats issus de la science qui serait dès lors une science participative.

Cela reviendrait ainsi à phaser les projets comme ceci :

- 1) Analyse / diagnostic recherche en faisant participer l'ensemble des parties prenantes ;
- 2) Mise en œuvre opérationnelle des recommandations issues de la première phase ;
- et 3) Évaluation du projet / de la réalisation par l'ensemble des parties prenantes.

Nous pensons que l'implication du chercheur dans toutes les phases du projet jusqu'à sa réalisation permet de mieux acculturer les personnes en charge de sa mise en œuvre en même temps que de permettre au chercheur une prise de conscience plus opérationnelle des enjeux de transition écologique.

L'Observatoire Participatif du Risque Canicule (OPRIC)

Béatrice GISCLARD (*UN - PROJEKT*), Marie-Julie CATOIR-BRISSON (*UN - PROJEKT*)

Même s'il n'existe pas de définition universelle de ce phénomène météorologique, la canicule est caractérisée par de très fortes chaleurs diurne et nocturne sur plusieurs jours consécutifs. La sécheresse se distingue de la canicule bien qu'elles soient souvent liées : l'une concerne l'absence de pluies sur une période, l'autre se réfère au niveau des températures de jour et de nuit durant une période prolongée.

En France le risque canicule est identifié comme un risque naturel majeur mais la réponse opérationnelle en termes de sécurité civile le classe dans la catégorie des risques sanitaires (*ORSEC, 2006*). En termes d'assurance, seule la sécheresse est prise en compte et elle représente 36 % du montant global de la sinistralité au titre des catastrophes naturelles entre 1982 et 2019 (*CCR, 2019*). En région Occitanie ce chiffre s'élève à 41 % (*CCR, 2020*) entre 1995 et 2019, pointant la vulnérabilité accrue du territoire face à ce risque.

Bien que des épisodes de fortes chaleurs aient pu être observés à des périodes préindustrielles, il est désormais établi que le rythme s'accélère dangereusement dû à l'impact de l'activité humaine sur le climat (*GIEC, 2018*). Concernant ce risque à une échelle locale, les projections issues du rapport « Eau et climat 3.0 » dans le Gard (*département du Gard, 2020*) prévoient une hausse généralisée des températures à l'horizon 2050 et 2100 et une augmentation de la température moyenne d'environ +0,5 °C par décennie par rapport à aujourd'hui.

Les simulations réalisées par Météo France sur l'arc méditerranéen vont dans le même sens : augmentation des vagues de chaleur avec des durées supérieures à un mois, de plus en plus de nuits anormalement chaudes et une augmentation de la sécheresse des sols. En 2019, c'est dans le Gard qu'a été enregistré le record absolu de température jamais mesurée en France, à savoir 45,9 °C à Gallargues-le-Montueux (Météo France) (**voir chapitre-enjeu Climat régional**).

Météo France identifie des seuils de vigilance qui varient selon les départements, en distinguant la vigilance, qui consiste à mettre en garde face à un risque (par essence, non encore réalisé), de l'alerte, déclenchée par le maire ou le préfet, qui prévient d'un danger avéré mettant en péril des individus. Or, dans le contexte d'un risque diffus, c'est-à-dire « dont les contours ne sont pas nettement définis », il est difficile pour les autorités de circonscrire précisément une temporalité, une emprise territoriale et les populations concernées.

En effet, tous les individus ne présentent pas le même degré d'exposition au risque canicule selon les vulnérabilités individuelles et/ou sociales : les personnes âgées, les nourrissons, les femmes enceintes, les personnes souffrant de pathologies aiguës, etc., mais également les personnes sans domicile fixe ou précaires, ne disposant pas d'un logement adapté (**voir chapitre-enjeu Santé**).

On relève également des inégalités territoriales face à ce risque : une analyse plus fine des phénomènes distingue les îlots de chaleur urbains (ICU) où les matériaux des bâtiments et des surfaces emmagasinent l'énergie solaire dans la journée et la restituent dans la nuit, ne permettant pas à l'air de se refroidir contrairement aux zones rurales, moins densément urbanisées (**voir chapitre-enjeu Milieux urbanisés**). La perception du nombre des victimes de la canicule est parfois minorée du fait de son expansion temporelle, a contrario d'une catastrophe ponctuelle plus à même de marquer les esprits (inondation, séisme ou tsunami par exemple). En France, le nombre de morts par jour durant l'épisode de canicule de l'été 2003 était supérieur à celui relevé durant la crise sanitaire du printemps 2020, avec une mortalité caniculaire plus brève et plus intense que celle due au Covid-19 ([INSEE, 2020](#)). La perception de la gravité d'une situation diffère parfois fortement des faits et chiffres établis en lien avec ladite situation. À ce titre, le risque canicule n'échappe pas à ce paradoxe, renforcé par les choix médiatiques du moment.

Partant du constat que ce risque est en augmentation mais que ses manifestations (amplitude géographique et temporelle et personnes concernées) font qu'il est mal appréhendé, tant par les populations que par les autorités en charge de sa gestion, nous avons souhaité développer une approche originale dans le cadre du WP5 de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) et du projet INPLIC (INItiatives des Populations Locales et Intégration dans la Conduite de crise, projet d'analyse cofinancé par l'Agence Nationale de la Recherche et porté par le laboratoire DICEN du CNAM Paris, l'Université de Technologie de Troyes – Institut Charles Delaunay et le laboratoire Projekt de l'Université de Nîmes). Pour faire face à la canicule, les populations doivent souvent se débrouiller par leurs propres moyens et développer par elles-mêmes les compétences et les solutions nécessaires. Le parti-pris a été de s'appuyer sur les sciences participatives et des méthodologies issues du design social afin de développer un [Observatoire Participatif du Risque de Canicule](#) (OPRIC). Les objectifs de cet observatoire sont pluriels : contribuer à développer une conscience et une culture de ce risque en rassemblant et en rendant visibles des initiatives issues des populations pour faire face à ce phénomène, capitaliser sur la mémoire collective et individuelle de ce risque, co-construire des solutions frugales et ouvrir le champ à des imaginaires collectifs.

Une première étape a consisté à réaliser des immersions terrain auprès d'habitant.es à Nîmes et à proximité (mai-juin 2020). En parallèle, des entretiens ont été menés avec des professionnels (pompiers, collectivités territoriales, préfecture) et un travail de veille sur des initiatives en lien avec le risque a été effectué. Compte-tenu de la période particulière (contexte sanitaire et confinement) du printemps 2020, les réseaux sociaux ont été mobilisés pour recueillir des informations, échanger avec les habitant.es et personnes intéressées via la [page Facebook](#) créée à cet effet.

Toutes ces initiatives, mises en place sur le territoire occitan et en ligne, ont contribué à constituer une communauté d'intérêts impliquant des citoyens autour du risque canicule.

Le 3 septembre 2020, nous avons réalisé un premier atelier participatif au FabLab de Nîmes grâce à l'appui des agences de design social [Étrange-Ordinaire](#) et [CommunHic](#). L'atelier, qui a réuni une vingtaine de participant.es (habitant.es et spécialistes) sur une journée, était réparti en quatre activités. La première concernait la perception et les ressentis de la canicule et mettait les participant.es au défi de créer le nuancier de la perception et du ressenti de la canicule. La deuxième activité avait pour objectif de capitaliser sur la connaissance en créant une mémoire vivante du risque. Dans la troisième activité, il s'agissait de définir un langage caniculaire via la sémantique, le champ lexical et les stratégies de communication. Enfin, dans la quatrième activité, le design fiction était mobilisé pour faire face à des scénarios de situations de crise caniculaire. Le « chaman » guidait le voyageur dans son récit, le « scribe » était en charge de la retranscription et le « journaliste » posait des questions sur les points clés de la narration. Un second atelier a été réalisé en ligne - compte tenu de la crise sanitaire et en période de confinement - le 23 avril 2021 avec une quinzaine d'acteurs en charge de la gestion de la canicule au niveau territorial. Les participant.es devaient dans un premier temps cartographier les acteurs de la canicule au moyen de la plateforme de collaboration visuelle Miro©. Dans un second temps par équipe, il s'agissait de combiner des acteurs, des publics, des lieux dans une situation donnée (exemple : « *les individus s'équipent de climatiseurs. Ces derniers créent des nuisances sonores et contribuent à la hausse de la température dans la rue* ») et d'imaginer une solution répondant à la situation.

La recherche étant encore en cours, les résultats définitifs ne sont pas établis. Cependant, à partir des données récoltées et des premiers éléments issus des deux ateliers, nous pouvons néanmoins esquisser quelques réflexions. Le protocole d'enquête a permis de faire ressortir un réel intérêt pour le sujet malgré un contexte compliqué et des freins aux rencontres physiques et à l'accès au terrain. Les personnes rencontrées sont porteuses de propositions concrètes à mettre en œuvre pour faire face à la canicule et les méthodologies employées ont permis de valoriser les apports individuels et collectifs sur le sujet. Le croisement d'expertises et expériences des professionnels du risque avec celles des habitants a aussi permis de développer de nouvelles pistes de réflexion sur les modes d'action de l'observatoire, au-delà du projet INPLIC co-financé par l'ANR, en tissant des liens avec d'autres acteurs impliqués dans le risque canicule, aux niveaux local et national. Cette approche en co-construction a aussi permis de développer des pistes de solutions sous différentes formes (scénarios d'usage, cartographies, collections de photographies) qui constituent aussi des données probantes de recherche sur l'apport du design social à la problématique des risques.

Conclusion

Elsa CAUSSE (UN - CHROME), Béatrice JALENQUES-VIGOUROUX (UM - CEPREM)

A bien noter pour le lecteur, tout un pan de la communication environnementale est peu visible ici, il ne faudrait donc pas conclure que ce chapitre permette de prendre en compte tous les aspects de ce sujet. Les chercheurs en communication environnementale travaillent habituellement à l'échelle nationale et pas seulement à l'échelle d'un territoire comme celui de l'Occitanie, d'où ce manque.

Néanmoins, plusieurs aspects sont à retenir : l'efficacité de la communication engageante, mais dans un cadre très spécifique, l'efficacité des nudges mais également de la prise de conscience qui constitue toujours le préalable indispensable à l'action, bien qu'elle prenne un temps plus ou moins long.

Certaines pratiques apparemment efficaces ne le seraient que sur le court terme. L'efficacité d'une pratique doit donc toujours être considérée avec une grande prudence. Par ailleurs, nous tenons à souligner que les questions éthiques, non présentées ici, sont pourtant bien sous-jacentes aux pratiques de communication orientées vers le changement comportemental. Se posent alors les questions du libre-arbitre, de l'influence, de la persuasion, mais aussi de la manipulation.

Cela renvoie à la nécessité de la mise en place de garde-fous afin d'éviter les pratiques non respectueuses de ce libre-arbitre.

La transition nécessite des pratiques de communication qui permettent aux individus et aux collectifs constitués de dialoguer entre eux, à propos d'une action à mener, et pas d'agir directement en appliquant sans réfléchir ce qui est proposé.

Ce dialogue, ces dialogues, toujours à organiser, pourraient permettre de constituer une identité environnementale collective dont la mise en acte pourrait se traduire par des actions concrètes en cohérence avec cette nouvelle identité. Quand nous introduisons cette notion d'identité environnementale, il est finalement question de changements sociétaux profonds.

Ces changements majeurs sont difficiles à observer pour les chercheurs condamnés à des terrains souvent étroits pour des raisons de faisabilité. Mais ces chercheurs parviennent néanmoins à montrer la complexité des mutations en cours, comme certaines contributions de ce chapitre le laissent voir, et mettent ainsi en lumière certains leviers d'action.



Photo 12.5. Chercheurs et viticulteurs de Banyuls étudiant sur le terrain les options de réorganisation spatiale du vignoble, projet LACCAVE.
(Source : Étienne Delay, 2017)

BIBLIOGRAPHIE GÉNÉRALE

(par chapitre)

O. Introduction générale

Patt, A. (2013). Should adaptation be a distinct field of science? *Climate and Development*, vol. 5(3), p. 187-188.

Quenault, B. (2013). Retour critique sur la mobilisation du concept de résilience en lien avec l'adaptation des systèmes urbains au changement climatique. *EchoGéo*, (24).

Simonet, G. (2017). Note de recherche. L'adaptation, un concept systémique pour mieux penser les changements climatiques. *Noréis. Environnement, aménagement, société*, (245), 113-125.

Simonet G. (2015a). Le projet de recherche Analyse des Barrières et leviers aux STRatégies d'Adaptation aux Changements climatiques, le cas des collectivités urbaines (ABSTRACT-courba, 2014-2015), recherche réalisée pour le compte de l'ADEME et de l'AFD sous la direction de A. Leseur, rapport final, 140 p.

Simonet, G. (2015b). Une brève histoire de l'adaptation: l'évolution conceptuelle au fil des rapports du GIEC (1990-2014). *Natures Sciences Sociétés*, 23, S52-S64.

Simonet, G., et Leseur, A. (2019). Barriers and drivers to adaptation to climate change—a field study of ten French local authorities. *Climatic Change*, 155(4), 621-637.

UrbaLyon - Agence d'urbanisme pour le développement de l'agglomération lyonnaise (2011). Atelier d'innovation en urbanisme - Actes du séminaire de capitalisation du PIRVE.

1. Climat régional

Ban, N., Caillaud, C., Coppola, E., et al. (2021). The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution, Part I: Evaluation of precipitation. *Clim Dyn.* [En ligne](#).

Caillaud, C., Somot, S., Alias, A., Bernard-Bouissières, I., Fumière, Q., Laurantin, O., Seity, Y. et Ducrocq, V., (2021). Modelling Mediterranean heavy precipitation events at climate scale: an object-oriented evaluation of the CNRM-AROME convection-permitting regional climate model. *Clim Dyn* 56, 1717–1752. [En ligne](#).

Dubuisson, B., Bernus, S., Corre, L. et Drouin, A., (2020). Évolution des précipitations en France métropolitaine au cours des dernières décennies, XXXIII^e colloque de l'Association Internationale de Climatologie, p 247-252. [En ligne](#).

GIEC (2013). Résumé à l'intention des décideurs, Changements climatiques 2013 : Les éléments scientifiques. Contribution du Groupe de travail I au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat [sous la direction de Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley]. Cambridge University Press, Cambridge, Royaume-Uni et New York (État de New York), États-Unis d'Amérique.

IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yéatsçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Mohamed, B., Abdallah, A.M., El-Din, K.A., Nagy, H. and Shaltout, M., (2019). Inter-annual variability and trends of sea level and sea surface temperature in the mediterranean sea over the last 25 years. *Pure and Applied Geophysics*, 176(8), pp.3787-3810.

Pichelli, E., Coppola, E., Sobolowski, S., et al. (2021). The first multi-model ensemble of regional climate simulations at kilometer-scale resolution part 2: historical and future simulations of precipitation. *Clim Dyn.* [En ligne](#).

Rapport MedECC MAR1 (chapitre: drivers of change): Cherif S, et al., (2020). Drivers of change. In: *Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report* [Cramer W, Guiot J, Marini K (eds.)] Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP, Marseille, France, 128 pp, in press, [En ligne](#).

Ribes, A., Thao, S., Vautard, V., Dubuisson, B., Somot, S., et al. (2019). Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean. *Climate Dynamics*, Springer Verlag, 52 (1-2), pp.1095-1114. [En ligne](#).

Ruti, P. M., Somot, S., Giorgi, F., Dubois, C., Flaounas, E., Obermann, A., Dell'Aquila, A., Pisacane, G., Harzallah, A., Lombardi, E., et al. (2016). MED-CORDEX initiative for Mediterranean Climate studies. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 97(7), 1187-1208, July 2016. [En ligne](#). Voir aussi le site de l'initiative internationale Med-CORDEX. [En ligne](#).

Samacoits, R., Dubuisson, B., Gouget, V., Soubeyroux, J.-M. et Sorel, M. (2021). Analyses and projections of flood events in Occitanie, tools for potential replicability, Copernicus Climate Change Project FIAude, pp. 1-27. [En ligne](#).

Soubeyroux, J.-M., Bernus, S., Core, L., Drouin, A., Dubuisson, B., Etchevers, P., Gouget, V., Josse, P., Kerdoncuff, M., Samacoits, R et Tocquer, F. (2021). Les nouvelles projections climatiques de référence Drias 2020 pour la métropole. [En ligne](#).

Soubeyroux, J.-M., Capo, J., Tocquer, F., Parrant, M., Bresteaux, M., Nurel, R. et Guérin, N. (2021). Evaluation de nouveaux indicateurs climatiques pour le secteur éolien en France. Actes du colloque 2021 de l'AIC.

Vidal, J.-P., Martin, E., Baillon, M., Franchistéguy, L. et Soubeyroux, J.-M. (2010a). SAFRAN 50-year high-resolution meteorological reanalysis over France. *International Journal of Climatology*, 30(11), p 1627–1644. DOI : 10.1002/joc.2003.

Wöppelmann, G. and Marcos, M., (2012). Coastal sea level rise in southern Europe and the nonclimate contribution of vertical land motion. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C1).

2. Biodiversité

Amiot, J., Salmon Y., Collin, C., Thompson, J. D. (2005). Differential resistance to freezing and spatial distribution in a chemically polymorphic plant *Thymus vulgaris*. *Ecology Letters*, 8:370-377.

Agence régionale de la biodiversité (ARB) Occitanie (2021). Panorama de la biodiversité en Occitanie. [En ligne](#).

ATMO Occitanie (2019). L'air en Occitanie. [En ligne](#).

Bernard, C. (2009). Fleurs et paysages des Causses. Éditions du Rouergue. 398 p.

Beyou, W., Darses, O., Puydarrieux, P., Kervinio, Y., Tallandier-Lespinnasse, S., Hubert, S., (Efece) (2016). – Le service de pollinisation. 4pp.

Blondel, J. 2015. Oiseaux et changement global. Éditions Quae. 140 p.

Blondel, J., Aronson, J., Bodiou, J.-Y. and Boeuf, G. (2010). *The Mediterranean region: biological diversity in space and time*. 2nd Edition, Oxford University Press, New York.

BNV-D (2020). [En ligne](#).

- Boulant, N. (2008). Les mécanismes du recrutement des plantules et leurs effets sur la vitesse d'invasion des ligneux pionniers dans les pelouses : comparaison d'une espèce indigène (*Pinus sylvestris* L.) et d'une espèce introduite (*Pinus nigra* Arn. subsp. *nigra*) dans les Grands Causses. Thèse Université de Montpellier. 258 p.
- Cheptou P.-O., Carrue, O., Rouifed, S. and Cantarel, A. (2008). Rapid evolution of seed dispersal in an urban environment in the weed *Crepis sancta*. PNAS, 105, 3796–3799.
- Conchou, L., Lucas, P., Meslin, C., Proffit, M., Staudt, M., Renou, M. (2019). Insect Odorscapes: From Plant Volatiles to Natural Olfactory Scenes. *Frontiers in Physiology*, Frontiers, 1.
- DRAAF Occitanie, 2021. [En ligne](#).
- DREAL Occitanie (2020). État des lieux de l'artificialisation en Occitanie 2020. [En ligne](#).
- Drénou, C., Caraglio, Y. (2019). Parlez-vous ARCHI ? Forêt entreprise n°246
- Drénou, C., Giraud, F., Gravier, H., Sabatier, S., Caraglio, Y. (2013). Le diagnostic architectural : un outil d'évaluation des sapinières déperissantes. *Forêt Méditerranéenne*. T. XXXIV, n°2, 87-98.
- Drénou, C. (2012). La méthode ARCHI. *Forêt entreprise*, n°203, 29-31.
- Drénou, C., Bouvier, M., Lemaire, J. (2012). Rôles des gourmands dans la résilience des chênes pédonculés déperissants. *Forêt Wallonne*, n°116, 42-55.
- Drénou, C., Bouvier, M., Lemaire, J. (2011). La méthode de diagnostic ARCHI, application aux chênes pédonculés déperissants. *Forêt Entreprise-Central*, 4-15.
- Etterson, J. R. et Schaw, R. G. (2001). Constraint to adaptive evolution in response to global warming. *Science*, 294:151-154.
- Fargeon, H., Pimont, F., Martin-StPaul, N., De Caceres, M., Ruffault, J., Barbero, R., Dupuy, J.-L. (2020). Projections of fire danger under climate change over France: where do the greatest uncertainties lie? *Climatic Change*, 160:479–493.
- Fargeon, H. (2019). Effet du changement climatique sur l'évolution de l'aléa incendie de forêt en France métropolitaine au XXI^e siècle. Thèse de doctorat, Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech), INRA, UR 629 –Écologie des forêts méditerranéennes.
- Goux N. et Savoie J.M. (coordinateurs), Bouteloup R, Corriol G, Cuyppers T, Hannoire C, Infante Sanchez M., Maillé S. et Marc D (2019). Inventaire et caractérisation des noyaux de « vieilles forêts de plaine » Pour une continuité de la trame forestière entre Pyrénées et Massif-Central. Rapport final, Conservatoire d'espaces naturels Midi-Pyrénées / Ecole d'ingénieurs de Purpan. 64 p. + annexes.
- IPBES (2018). In: Rounsevell, M., Fischer, M., Torre-Marín Rando, A., Mader, A. (Eds.), *The IPBES Regional Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services for Europe and Central Asia*. Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn, Germany.
- IPBES (2016). Résumé à l'intention des décideurs de l'évaluation de la plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (ipbes) des pollinisateurs, de la pollinisation et de la production alimentaire. Potts, S.G., Imperatriz-Fonseca, V.L., Ngo, H.T., Biesmeijer, J.C. et al. (Eds.), 30pp.
- Jaulin S., Delevay A.-M. & Schatz B. (coord.) (2021). Plan régional d'actions en faveur des pollinisateurs sauvages d'Occitanie (2021-2030). Rapport pour la DREAL Occitanie, 68 p.
- Meddec (2020). Balzan M.V, Hassoun AER, Aroua N, Baldy V, Bou Dagher M, Branquinho C, Dutay J-C, El Bour M, Médail F, Mojtahid M, Morán-Ordóñez A, Roggero PP, Rossi Heras S, Schatz B, Vogiatzakis IN, Zaimis GN, Ziveri P. *Ecosystems*. In: *Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future*. First Mediterranean Assessment Report [Cramer W, Guiot J, Marini K (eds.)] Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP, Marseille, France, pp. 323-468.
- Ménoni, E., Montadert, M., Leclercq, B. (2020). The mating time of the capercaillie in the Pyrenees and the Jura become earlier and earlier. *Grouse News*, 58: 28-34.
- Moss, R., Oswald, J. et al. (2001). Climate change and breeding success: decline of the capercaillie in Scotland. *Journal of animal ecology*, 70:47-61.
- Pimont, F., Fargeon, H., Opitz, T., Ruffault, J., Barbero, R., Martin-StPaul, N., Rigolot, E., Rivière, M., Dupuy, J. (2021). Prediction of regional wildfire activity in the probabilistic Bayesian framework of Firelihood. *Ecological Applications*.
- Portail Occitanie littoral (2021). [En ligne](#).
- Renaux, B., et Villemey, A. (coord.) (2017). Identifier et caractériser les forêts anciennes du Massif central. État des connaissances – boîte-à-outils – perspectives. Conservatoire botanique national du Massif central \ Union Européenne (FEDER Massif central), République française (FNADT), Région Auvergne-Rhône-Alpes, Région Nouvelle-Aquitaine, Département de l'Allier, 94 p. + 1 volume d'annexes.
- Rossi M., Bardin, P., Cateau E., Vallauri D. (2013). Forêts anciennes de Méditerranée et montagnes limitrophes. Références pour la naturalité régionale. WWF France, Marseille, 144 pages.
- Sanchez-Bayo, F., Wyckhuys, K.A.G. (2019). Worldwide decline of the entomofauna: a review of its drivers. *Biol. Conserv.* 232, 8–27. [En ligne](#).
- Savoie, J.M. et al. (2015). Vieilles forêts pyrénéennes de Midi-Pyrénées. Deuxième phase. Evaluation et cartographie des sites. Recommandations. Rapport final. Ecole d'Ingénieurs de PURPAN/DREAL Midi-Pyrénées, 125 p.
- Schatz B., Gauthier P., Debussche M. & Thompson J. (2014). A decision tool for listing species for protection on different geographic scales and administrative levels. *Journal for Nature Conservation* 22: 75-83.
- Sirami, C., Nespoulous, A., Cheylan, J.-P., Marty, P., Hvenegaard, G.T., Geniez, P., Schatz, B. & Martin, J.-L. (2010). Long-term anthropogenic and ecological dynamics of a Mediterranean landscape: impacts on multiple taxa. *Landscape and Urban Planning* 96: 214-223.
- Thompson, J. D. (2020). *Plant evolution in the Mediterranean*. Insights for conservation. Oxford University Press, Oxford.
- Thompson, J. D., Charpentier, A., Bouguet, G., Charmasson, F., Roset, S., Buatois, B., Vernet, P., Gouyon, P.-H. (2013). Evolution of a genetic polymorphism with climate change in a Mediterranean landscape. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 110 : 2893-2289.
- Thompson, J. D., Gauthier, P., Amiot, J., Ehlers, B. K., Collin, C., Fos-sat, J., Barrios, V., Arnaud-Miramont, F., Keefover-Ring, K., Linhart, Y. B. (2007). Ongoing adaptation to Mediterranean climate extremes in a chemically polymorphic plant. *Ecological Monographs*, 77:421-439.
- UICN (Comité Français) (2020). *La Liste Rouge des Écosystèmes en France - Chapitre Littoraux méditerranéens de France métropolitaine, Vol 1 : dunes côtières et rivages sableux*, Paris, France, 28 pages.
- UICN France (2018). *Les Solutions fondées sur la nature pour lutter contre les changements climatiques et réduire les risques naturels en France*. Paris, France.
- Vanderplanck, M., Lapeyre, B. Brondani, M., Opsommer, M., Dufay, M., Hossaert-McKey, M., Proffit, M. (2021). Ozone pollution alters olfaction and behavior of pollinators. *Antioxidants*, 10, 636. [En ligne](#).
- Vimal R. (2010). Des aires protégées aux réseaux écologiques : science, technique et participation pour penser collectivement la durabilité des territoires. Thèse en sciences de l'environnement, Université

Vogt-Schilb H., Moreau P.A., Malaval J.C., Schatz B, Richard F. (2018). Effects of long-term landscape dynamics and city growth on biodiversity in the Mediterranean: the case study of Montpellier, France. *Urban Ecosystem* doi: 10.1007/s11252-018-0780-8

Wegge, P., Rolstad, J. (2017). Climate change and bird reproduction: warmer springs benefit breeding success in boreal forest grouse. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284:1866.

Zattara, E. E., Aizen, M.A. (2021). Worldwide occurrence records suggest a global decline in bee species richness. *One Earth* 4 (1), 114–123. [En ligne](#).

3. Eau

Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, (2021). État des eaux lagunaires de Rhône Méditerranée et de Corse. Collection « Eau et connaissance ». 143 pp.

Agences de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse et Adour-Garonne, Région Occitanie (2017). État des lieux sur les ressources et les milieux aquatiques de la région Occitanie / Pyrénées – Méditerranée. H2030, l'eau en partage.

Aubé, D. (2016). Impacts du changement climatique dans le domaine de l'eau sur les bassins Rhône-Méditerranée et Corse - Bilan actualisé des connaissances. Collection « eau & connaissance ». 114 pp.

Barone S., Barbier R., Destandau F., Garin P. (dir.), 2018, Gouvernance de l'eau : un mouvement de réforme perpétuelle ?, Paris, L'Harmattan, collection « Sociologies et environnement », 260 p.

Barraqué, B. (2007). Les Agences de l'eau et le contexte de la régionalisation. *Responsabilité et Environnement*, n°46 (avril), pp. 73-80.

Brugeron, A., Paroissien, J.B., Tillier, L. (2018). Référentiel hydrogéologique BDLISA version 2 : Principes de construction et évolutions. Rapport final BRGM/RP-67489-FR. 69 p.

Caballero, Y., Lanini, S., Lechevalier, J., Maréchal, J.-C. (2021). Caractérisation de la recharge des aquifères et évolution future en contexte de changement climatique - Application au bassin Rhône Méditerranée Corse - Phase 2. Rapport final. BRGM/RP-69217-FR, 150 p.

Cakir, R. (2020). Les fonctions écologiques de régulation des nitrates au sein des bassins versants : des cours d'eau aux territoires. Thèse Université Paul Sabatier - Toulouse III.

Calianno, M., Reynard, E., Milano, M., Buchs, A. (2017). Quantifier les usages de l'eau : une clarification terminologique et conceptuelle pour lever les confusions. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [[En ligne](#)], Volume 17 Numéro 1.

CGDD (Commissariat Général au Développement Durable), (2017). Les prélèvements d'eau douce en France: les grands usages en 2013 et leur évolution depuis 20 ans. Service de l'observation et des statistiques, MEEM, France, 26 pp.

Colon, M., Richard, S., Roche, P.-A. (2018). The evolution of water governance in France from the 1960s: disputes as major drivers for radical changes within a consensual framework. *Water International*, 43 (1), pp.109-132.

Colmet-Daage, A. (2018). Les impacts du changement climatique sur les pluies et les inondations extrêmes de bassins versants méso-échelles méditerranéens. Thèse Université de Montpellier.

Dayon, G., Boé, J., Martin, É., Gailhard, J. (2018). Impacts of climate change on the hydrological cycle over France and associated uncertainties. *Comptes Rendus Geoscience*, 350(4), 141–153. [En ligne](#).

Dayon, G. (2015). Evolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier.

Derolez, V., Soudant, D., Malet, N., Chiantella, C., Richard, M., Abadie, E., Aliaume, C., Bec, B. (2020). Two decades of oligotrophication: Evidence for a phytoplankton community shift in the coastal lagoon of Thau (Mediterranean Sea, France). *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 241,

Deutsch, J.-C., Gautheron, I. (Eds.) (2013). *Eaux pour la ville* Eau des villes, Eugène Belgrand XIXe-XXIe siècle. Paris.

Di Sante, F., Coppola, E., Giorgi, F. (2021). Projections of river floods in Europe using EURO-CORDEX, CMIP5 and CMIP6 simulations. *International Journal of Climatology*, 41(5), 3203–3221. [En ligne](#).

Eaucéa, (2020). État des lieux sur les ressources et les milieux aquatiques en Occitanie. H2030. Région Occitanie-ARPE. En ligne.

Esteves, K., Hervio-Heath, D., Mosser, T., Rodier, C., Tournoud, M.-G., Jumas-Bilak, E., Colwell, R.R., Monfort, P. (2015). Rapid proliferation of *Vibrio parahaemolyticus*, *Vibrio vulnificus*, and *Vibrio cholerae* during freshwater flash floods in French Mediterranean coastal lagoons. *Appl Environ Microbiol* 81:7600–7609.

Explore 2070, (2012). Vulnérabilité des milieux aquatiques et de leurs écosystèmes. Étude des zones humides. Ministère de l'écologie et du développement durable. 144 pp.

Fabre, J., Ruelland, D., Dezetter, A., Grouillet, B. (2016). Réduction du déficit entre demande et disponibilité en eau sous scénarios de changements climatiques et d'usages de l'eau : efficacité et robustesse de mesures d'adaptation. *La Houille Blanche*, 6 ; 21-29.

Ghiotti, S. (2012). La politique européenne de l'eau et de l'environnement face aux enjeux de l'intégration Régionale. Le cas des régions méditerranéennes françaises. In Maganda (C.), Petit (O.) (éds), *La gouvernance des ressources naturelles stratégiques. Perspectives contemporaines dans le domaine de l'environnement*, Bruxelles, PIE Peter Lang, Coll «Regional Integration and Social Cohesion», pp. 151-169.

Grouillet, B., Fabre, J., Ruelland, D., Dezetter, A. (2015). Historical reconstruction and 2050 projections of water demand under anthropogenic and climate changes in two contrasted Mediterranean catchments. *Journal of Hydrology* 522, 684-696.

Grusson, Y., Anctil, F., Sauvage, S., Sánchez Pérez, J.M. (2018). Co-evolution of Hydrological Cycle Components under Climate Change: The Case of the Garonne River in France. *Water* 10, 1870. doi: 10.3390/w10121870.

Harader, E. (2015). L'impact du changement climatique sur les événements hydrologiques extrêmes des petits bassins versants méditerranéens : le cas du bassin versant du Lez. Thèse Université Paul Sabatier - Toulouse III.

IPCC, (2007). In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Labrousse, C., Ludwig, W., Pinel, S., Sadaoui, M., and Lacquement, G. (2020). Unravelling Climate and Anthropogenic Forcings on the Evolution of Surface Water Resources in Southern France, *Water*, 12, 3581, [En ligne](#).

Labrousse, C. (thèse à soutenir en 2021). Changements climatiques et hydrologiques en région Occitanie-Est: évolutions historiques et projections pour le 21ème siècle (titre provisoire). Thèse Université de Perpignan.

Lanini, S., Caballero, Y., Le Cointe, P., Béranger, S., Arnaud, L., Pinson, S. (2019). Recharge des aquifères à l'échelle de la France : estimation, évolution et incertitudes associées. Colloque SHF-UNESCO : Sécheresses, étiages et déficits en eau, Dec 2019, Paris, France. (hal-02159826).

Le Cointe, P., Arnaud, L., Beranger, S., Caballero, Y., Lanini, S. (2020). Réponse des Eaux souterraines au CHangement climatique dans le bassin Adour-Garonne (RECHARGE). Rapport final. BRGM/RP-67149-FR, 142 p.

Lespinas, F. (2008). Impacts du changement climatique sur l'hydrologie des fleuves côtiers en région Languedoc-Roussillon. Thèse Université de Perpignan.

Minaudo, C., Meybeck, M., Moatar, F., Gassama, N., Curie, F. (2015).

Eutrophication mitigation in rivers: 30 years of trends in spatial and seasonal patterns of biogeochemistry of the Loire River (1980–2012). *Biogeosciences* 12, 2549–2563.

Molle, F., Wester, Ph., Hirsch, Ph., Jensen, J.R., Murray-Rust, H., Paranjpye, S., Van der Zaag, P. (2007). River basin development and management, chap. 16 in Molden D (Ed.), *Water for Food - Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*, Earthscan, pp. 585-625.

Observatoire des services d'eau et d'assainissement. En ligne.

Onerc (2011). L'adaptation de la France au changement climatique. La documentation française, 80 p.

Pagé, C., Terray, L. et Boé, J. (2009). Dsclim: A software package to downscale climate scenarios at regional scale using a weather-typing based statistical methodology. Technical Report TR/CMGC/09/21, SUC au CERFACS, URA CERFACS/CNRS No1875, Toulouse, France.

Pinay G., Gascuel C., Menesguen A., Souchon Y., Le Moal M., Levain A., Moatar F., Pannard A., Souchu P. (2017). L'eutrophisation : manifestations, causes, conséquences et prédictibilité. Synthèse de l'Expertise scientifique collective CNRS - Ifremer - INRA - Irstea. [En ligne](#).

Richard, S, Rieu, T. (2017). Gouvernance multi-échelle de la rivière Durance en Provence (France) : une ressource en eau rare, historiquement disputée. Regards géopolitiques, Conseil Québécois d'études géopolitiques, n°1, vol. 3.

Rinaudo, J. D., Neverre, N. (2019). La prévision à moyen et long terme de la demande en eau potable : bilan des méthodes et pratiques actuelles. Agence française pour la biodiversité. Collection Comprendre pour agir. 84 pages.

Sauquet, E., Lang, M. (2017). Flood regimes - recent development and future under climate change. Vinet, F. (ed). *Floods, Volume 1 - Risk Knowledge*, ISTE Press - Elsevier, pp.299-309. hal-01741600.

SDAGE AG, (2015). Un nouvel élan pour l'Eau. 207 p.

SDAGE RMC, (2015). Rapport d'évaluation environnementale définitif du SDAGE 2016-2021 Rhône-Méditerranée. 324 p.

Taylor, K. E., Stouffer, R. J., and Meehl, G. A. (2012). An Overview of Cmp5 and the Experiment Design. *B. Am. Meteorol. Soc.*, 93 : 485–498.

Tramblay, Y., Ribes, A., Somot, S., Neppel, L., Lucas-Picher, P., Vinet, F., Sauquet, E. (2021a). Impacts du changement climatique sur les pluies intenses et les crues en méditerranée. *La Houille Blanche*. [En ligne](#).

Tramblay, Y., Rutkowska, A., Sauquet, E., Sefton, C., Laaha, G., Osuch, M., Albuquerque, T., Alves, M. H., Banasik, K., Beaufort, A., Brocca, L., Camici, S., Csabai, Z., Dakhlou, H., DeGirolamo, A. M., Dörflinger, G., Gallart, F., Gauster, T., Hanich, L., Kohnová, S., Mediero, L., Plamen, N., Pary, S., Quintana-Seguí, P., Tzoraki, O., Datry, T. (2021b). Trends in flow intermittence for European rivers. *Hydrological Sciences Journal* 66, 37–49. [En ligne](#).

Tramblay, Y., Koutroulis, A., Samaniego, L., Vicente-Serrano, S. M., Voilaire, F., Boone, A., Le Page, M., Llasat, M. C., Albergel, C., Burak, Z. S., Cailleret, M., Cindric Kalin, K., Davi, H., Dupuy, J.-L., Greve, P., Grilakis, M., Hanich, L., Jarlan, L., Martin-St-Paul, N., Martinez-Vilalta, J., Mouillot, F., Pulido Velazquez, D., Quintana Seguí, P., Renard, D., Turco, M., Türkes, M., Trigo, R., Vidal, J.-P., Vilagrosa, A., Zribi, M., Polcher, J. (2020). Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios. *Earth-Science Reviews*, 210, 103348.

Tramblay, Y, Mimeau, L., Neppel, L., Vinet, F., Sauquet, E. (2019). Detection and attribution of flood trends in Mediterranean basins. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 23, 4419–4431. [En ligne](#).

Tramblay, Y., Neppel, L., Carreau, J., Sanchez-Gomez, E. (2012). Extreme value modelling of daily areal rainfall over Mediterranean catchments in a changing climate. *Hydrol. Process*. 26, 3934–3944.

Wells, M. L., Trainer, V. L., Smayda, T. J., Karlson, B. S. O., Trick, C. G., Kudela, R. M., Ishikawa, A., Bernard, S., Wulff, A., Anderson, D. M. (2015). Harmful algal blooms and climate change: Learning from the past and present to forecast the future. *Harmful Algae* 49, 68–93.

4. Santé

Albrecht, A. (2020). *Les Émotions de la Terre. Des nouveaux mots pour un nouveau monde*, Les Liens qui libèrent, 368 p.

Alonso, L., Renard, F. (2020). A Comparative Study of the Physiological and Socio-Economic Vulnerabilities to Heat Waves of the Population of the Metropolis of Lyon (France) in a Climate Change Context, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 17, no 3, 21p. [En ligne](#).

ANSES, (2016). Actualisation des repères du PNNS : étude des relations entre consommation de groupes d'aliments et risque de maladies chroniques non transmissibles. Rapport d'expertise collective, 180p.

ANSES, (2020). Les vecteurs et les maladies qu'ils transmettent

ATMO Occitanie (2019). L'air en Occitanie. [En ligne](#).

Bélanger, D., Gosselin, P., Bustinza, R., Campagna, C. et Sant'ana, M. (2019). Changements climatiques et santé: prévenir, soigner et s'adapter, Québec, Presses de l'Université Laval, 213p.

Bernard, P., Chevance, G., Kingsbury, C. et al. (2021). Climate Change, Physical Activity and Sport: A Systematic Review. *Sports Med.* [En ligne](#).

Bronfenbrenner, U. (1986). Ecology of the Family as a Context for Human Development: Research Perspectives. *Developmental Psychology*, 22(6), 723-742

Centre Européen de Prévention du Risque d'Inondation. (2018). Guide de sensibilisation : Le secteur de la santé face au risque d'inondation – 56p.

Chevalier, V., et al. (2015). Changement climatique et maladies animales à transmission vectorielle. *Changement climatique et agricultures du monde*. Editions Quae, p. 96-106.

Corso, M., Pascal, M., Wagner, V., Blanchard, M., Blateau, A., Cochet, A., et al. (2015). Impact à court terme des particules en suspension (PM10) sur la mortalité dans 17 villes françaises, 2007- 2010. *Bull Epi-démiol Hebd.* (1-2):14-20.

Crouse, D.L. et al. (2017). Dans Meyer-Grandbastien, A. et al. (2021)

Duvallet, G., Fontenille, D. et Robert, V. (éds.) (2017). *Entomologie médicale et vétérinaire*. Quae/IRD Éditions, 687p.

Fontès-Rousseau, C., Rodes, V. (2019). Une qualité de vie en Occitanie contrastée selon les territoires. *INSEE Analyses Occitanie – N°67*, 4p.

Freud, S. (1904). *La méthode psychanalytique*. Dans *La technique psychanalytique*. Paris, PUF, 1972, p.6.

Goffman, E. (1963). *Stigmata. Les usages sociaux du handicap*. Paris, Les Éditions de Minuit. 176p.

Grison, C., Lock Toy Ki, Y. (2021). Ecocatalysis, a new vision of Green and Sustainable Chemistry, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. [En ligne](#).

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. (2013). 5^e rapport d'évaluation (AR5).

Haut Conseil de la santé publique, (2015). Impacts sanitaires de la stratégie d'adaptation au changement climatique Méthodologie de recherche et d'évaluation - Observations et recommandations. Paris : La Documentation française, collection Avis et Rapport, 136p. [En ligne](#).

INJEP (Institut national de la jeunesse et de l'éducation populaire), (2020). Fiche régionale du sport, Occitanie

IRD, (2015). *Changement climatique Quels défis pour le Sud ?*, 306p.

Kraemer, M., et al. (2019). Past and future spread of the arbovirus vectors *Aedes aegypti* and *Aedes albopictus*. *Nat Microbiol*, 4 : 854–863. [En ligne](#).

Lajarge, É., Debiève, H., Nicollet, Z. & Piou, S. (2017). 11. La santé environnementale. Dans É. Lajarge, H. Debiève, Z. Nicollet & S. Piou (Dir), *Santé publique: En 13 notions* (pp. 271-279). Paris: Dunod.

Lardellier, R. (Insee), Gautier, C., Guyon, C. (Météo-France) (2020). Un habitant sur deux potentiellement exposé à de fortes chaleurs à répétition dans les prochaines années. *INSEE Analyses Occitanie - n°92*, 4p.

Martin, S. et Gaspard, A. (2016), *Changer les comportements, faire évoluer les pratiques sociales vers plus de durabilité : L'apport des sciences humaines et sociales pour comprendre et agir*, ADEME, 180 p.

Meyer-Grandbastien, A., Vajou, B., Fromage, B., Galopin, G., Laille, P. (2021). Effets bénéfiques des espaces de nature en ville sur la santé : Synthèse des recherches internationales et clés de compréhension. *Plante & Cité*, Angers, 18p.

MIIAM, et al. (2021). Portrait de territoire « inondation arc méditerranéen » - Synthèse d'une enquête auprès des directeurs d'établissements – 20p.

MIIAM, et al. (2021). Portrait de territoire « inondation arc méditerranéen » - Exposition des EHPAD aux risques d'inondation sur l'arc méditerranéen – 64p.

Ministère des Solidarités et de la Santé, (2021). Cartes de présence du moustique tigre (*Aedes albopictus*) en France métropolitaine. [En ligne](#).

Nutsford, D. et al. (2013). Dans Meyer-Grandbastien, A. et al. (2021)

Odoxa, Ligue contre l'obésité, Sciences Po Chaire santé, ObEpi Roche. (2021). Enquête épidémiologique nationale sur le surpoids et l'obésité pour la Ligue contre l'Obésité

Pascal, M. (Santé Publique France) (2021). Quels indicateurs pour faciliter la prise en compte de la santé publique dans les politiques d'adaptation au changement climatique ? 66p.

Pierron, J. (2013). Au-delà de l'anthropocentrisme : la nature comme partenaire. *Revue du MAUSS*, 42, p41-48. [En ligne](#).

Ponçon, N., et al. (2008). A quantitative risk assessment approach for mosquito-borne diseases : Malaria re-emergence in southern France. *Malaria Journal*, 7 (1) : 13 p. [En ligne](#).

Ribes, A., Thao, S., Vautard, R. et al. (2019). Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean. *Clim Dyn* 52, 1095–1114. [En ligne](#).

Rodhain, F. (éd.), (2003). *Changement climatique, maladies infectieuses et allergiques*. Annales de l'Institut Pasteur, Elsevier, Masson, Paris, 147p.

Rodhain, F. (2015). *Le parasite, le moustique, l'homme... et les autres*. Editions Docis, Paris, 443p.

Rojas-Rueda, D. et al. (2019). Dans Meyer-Grandbastien, A. et al. (2021)

Roué-Le Gall, A., Le Gall, J., Potelon, J.-L., Cuzin, Y. (2014). Agir pour un urbanisme favorable à la santé, concepts & outils. Guide EHESP/DGS, 192p.

Ségala, C. (2010). in : Roussel, I., Charles, L., & Rambaud, J.-M. (2010). L'évaluation et la perception de l'exposition à la pollution atmosphérique : une interrogation sociétale Analyse critique des résultats du programme PRIMEQUAL. Retrieved October 16, 2017. [En ligne](#).

Séguin, M. (2007). La transmission intergénérationnelle du mauvais [1]. *Psychothérapies*, 27, 149-160.

Sonntag-Öström, E. et al. (2014). Dans Meyer-Grandbastien, A. et al. (2021).

Swinburn, BA, Kraack, VI, Allender, S et al. (2019). The global syndemic of obesity, undernutrition, and climate change: The Lancet Commission report. *Lancet*. 23;393(10173):791-846

Tran, A. et al. (2020a). Démonstrateur ARBOCARTO, doi :10.18167/DVN1/APVHYM, CIRAD Dataverse, V1

Tran, A., et al. (2020b). Complementarity of empirical and process-based approaches to modelling mosquito population dynamics with *Aedes albopictus* as an example - Application to the development of an operational mapping tool of vector populations. *PLoS One*, 15 (1) : 21 p. doi :10.1371/journal.pone.0227407

Union Régionale des Professionnels de Santé Libéraux (URPS) Occitanie.

Tsunetsugu, Y. et al. (2013). Dans Meyer-Grandbastien, A. et al. (2021)

Van Cauteren, D., Le Strat, Y., Sommen, C., Bruyand, M., Tourdjman, M., Jourdan-Da Silva, N., et al. (2018). Estimation de la morbidité et de la mortalité liées aux infections d'origine alimentaire en France métropolitaine, 2008-2013. *Bull Epidémiol Hebd*. 2018;(1):2-1

WHO | COP24, (2018). Special report: Health & Climate Change. [En ligne](#).

Willett, W., Rockström, J., Loken, B. et al. (2019). Food in the Anthropocene: the EAT-Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *Lancet*. 2;393(10170):447-492

WWF France, (2021). *Dérèglement climatique : le monde du sport à +2°C et +4°C*, 64p.

5. Milieux urbanisés

Ait Haddou, H., Chante, A., Dousson, L., Viala, L. (2021). Une maison intelligente pour quoi faire ? Les technologies de l'information et de la communication au service de l'habiter : enjeux éthiques de l'innovation. *Revue Communication & Management*, 17 : 5-6.

ANR VegDUD, 2007-2014. [En ligne](#).

Aulagnier, S., Almosni, N., Dupont, F., Lefebvre-Naré, F. (2015). Étude prospective sur les impacts du changement climatique pour le bâtiment à l'horizon 2030 à 2050. Rapport final, ADEME, 115 pages.

Bao, S. (2021). Les services écosystémiques rendus par les parcelles boisées de Montpellier. *Cahier technique*.

BD Parcellaire, Parcelles cadastrales en format vectoriel. [En ligne](#).

Bocher, E., Petit, G., Bernard, J., Palominos, S. (2018). A geoprocessing framework to compute urban indicators: The MApUCE tools chain. *Urban Climate*, 24 : 153-174.

CCR – Service R&D modélisation, Département des Études Techniques, Direction des réassurances publiques (2015). Modélisation de l'impact du changement climatique sur les dommages assurés dans le cadre du régime Catastrophes Naturelles. [En ligne](#).

Chen, Qi, Baldocchi, D. Gong, P. Kelly, M. (2006). Isolating individual trees in a savanna woodland using small footprint lidar data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 72:8, 923-932.

Chneiweiss, A., Bardaji, J. (2020). Les assureurs face au défi climatique. Rapport Fondapol.

Claude, S., Ginestet, S., Bonhomme, M., Escadeillas, G., Taylor, J., Marincioni, V., Korolija, I., Altamirano, H. (2019). Evaluating retrofit options in a historical city center: Relevance of bio-based insulation and the need to consider complex urban form in decision-making. *Energy and Buildings*, 182 : 196-204.

David, A. J., Boura, A., Lata, J.-C., Rankovic, A., Kraepiel, Y. et al. (2017). Street trees in Paris are sensitive to spring and autumn precipitation and recent climate changes, *Urban Ecosystems*. Springer Verlag, 13 p. 10.1007/s11252-017-0704-z.

Degerickx et al. (2018). Enhancing the performance of Multiple End-member Spectral Mixture Analysis (MESMA) for urban landcover mapping using airborne lidar data and band selection. *Remote Sensing of Environment*, 221:260-273. DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.026.

Differt, J. (2001). Phénologie des espèces arborées. Synthèse bibliographique. Analyse des données du Réseau National de Suivi à long terme des Écosystèmes forestiers (RENECOFOR). Laboratoire d'étude des ressources Forêts-Bois. Unité Mixte de Recherche INRA-ENGREF 1092.

Dumas, G. (2021). Mise en place de services climatiques au sein de la Métropole Toulousaine à base d'un réseau d'observation pour le monitoring de l'îlot de chaleur urbain. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier. Direction : Valéry Masson, CNRM ; Julia Hidalgo, LISST.

Dumas, G. (2017). Conception et mobilisation des cartographies des « Zones Climatiques Locales », entre recherche en climatologie urbaine et métiers de l'urbanisme. Mémoire de Master 2 Villes Habitat et Transition Ecologique, 2016-17.

Dynamiques d'Occitanie (2017). Regards croisés des agences d'urbanisme. [En ligne](#).

Eckstein, D., Künzel, V., Schäfer, L., Winges, M. (2019). Global Climate Risk Index 2020. Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-Related Loss Events in 2018 and 1999 to 2018. GermanWatch.

Escobedo, F. J., Kroeger, T., Wagner, J. E. (2011). Urban forests and pollution mitigation: Analyzing ecosystem services and disservices. *Environmental Pollution*, 159, 8-9 : 2078-2087. [En ligne](#).

Fassnacht, F. E., Latifi, H., Stere Nczak, K., Modzelewska, A., Lefsky, M., Waser, L. T., Straub, C., Ghosh, A. (2016). Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 186, 64-87.

Fédération Française de l'Assurance (FFA) (2015). Risques Climatiques : quel impact sur l'assurance contre les aléas naturels à l'horizon 2040 ? [En ligne](#).

Feng, Q., Liu, J. Gong, J. (2015). Urban flood mapping based on unmanned aerial vehicle remote sensing and random forest classifier—A case of Yuyao, China. *Water* 7:4, 1437-1455.

Gallissot, M. (2012). Modéliser le concept de confort dans un habitat intelligent : du multi sensoriel au comportement. Thèse de doctorat.

Gardes, T., Schoetter, R., Hidalgo, J., Long, N., Marquès, E., Masson, V. (2020). Statistical prediction of the nocturnal urban heat island intensity based on urban morphology and geographical factors - An investigation based on numerical model results for a large ensemble of French cities. *Science of The Total Environment*, 737:139253. [En ligne](#).

Gourdier, S., et Plat, E. (2018). Impact du changement climatique sur la sinistralité due au retrait-gonflement des argiles. Journées Nationales de Géotechnique et Géologie de l'Ingénieur (JNGG), Champs-sur-Marne, France. [En ligne](#).

Guinot, V. (2012). Multiple porosity shallow water models for macroscopic modelling of urban floods. *Adv. Water Resource* 37, 40-72.

Guinot, V., Delenne, C., Rousseau, A., Boutron, O. (2018). Flux closures and source term models for shallow water models with depth-dependent integral porosity. *Advances in Water Resources*, 109 :133-157, 2018.

Granero-Belinchon C., K. Adeline, and X. Briottet (2021). Impact of the number of dates and their sampling on a NDVI time series reconstruction methodology to monitor urban trees with Venus satellite, 2021. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*,

95, 102257. [En ligne](#).

Granero-Belinchon C., A. Michel, V. Achard and X. Briottet (2020). Spectral Unmixing for Thermal Infrared Multi-Spectral Airborne Imagery over Urban Environments: Day and Night Synergy. *Remote Sens*, 12:1871. [En ligne](#).

Granero-Belinchon, C., Michel, A., Lagouarde, J.-P., Sobrino, J., Briottet, X. (2019). Multi-Resolution Study of Thermal Unmixing Techniques over Madrid Urban Area: Case Study of TRISHNA Mission. *Remote Sensing*, 11:1251.

Grenelle de l'Environnement, 2007.

Grimm N., Foster, D., Groffman, P., Grove, J. M., Hopkinson, C. S., Nadelhoffer, K. J., Pataki, D. E., Peters, D. P. C. (2008). The changing landscape: ecosystem responses to urbanization and pollution across climatic and societal gradients. *Front Ecol Environ*, 6(5): 264-272. [En ligne](#).

Grimmond, C. S. B., Oke, T. R. (1999). Heat storage in urban areas: local-scale observations and evaluation of a simple model. *J. Appl. Meteorol*, 38 : 922-940.

Hidalgo J., Touati, N., Jegou, L., Haouès-Jouve, S., Bahoken, F., Bronner, A.-C., Le Campion, G., Jouglu, R., Mainsonhobe, M., Pierson, J., Pissosat, O. (2021). Mapping the urban climate for summer comfort management in urban planning: climate analysis and semiology of graphs. *Cybergeo, Open Edition, soumis*.

Hidalgo, J., Dumas, G. et al. (2019). Comparison between local climate zones maps derived from administrative datasets and satellite observations. *Urban Climate*, 27, p. 64-89. [En ligne](#).

IGN – BDTOPO, Données topographiques en format vectoriel qui contiennent des informations sur des bâtiments individuels. [En ligne](#).

INSEE, (2018). [En ligne](#).

INSEE – Recensement, Données démographiques et socioéconomiques sur les habitants et des informations sur les caractéristiques et l'équipement des logements.

Joly, D., Brossard, T., Cardot, H., Cavailles, J., Hilal, M., Wavresky, P. (2010). Les types de climats en France, une construction spatiale. *Cybergeo, European Journal of Geography*.

Kounkou-A., R., Desplat, J., Salagnac, J. L., Lemonsu, A. (2012). Influence of built environment on the urban climate of Paris: the EPICEA project. ICUC8 – 8th International Conference on Urban Climates, 6th-10th August, UCD, Dublin Ireland.

Li, E., Parker, S. S., Pauly, G. B., Randall, J. M., Brown, B. V., Cohen, B. S. (2019). An Urban Biodiversity Assessment Framework That Combines an Urban Habitat Classification Scheme and Citizen Science Data. *Frontiers in Ecology Evolution*, 7:277.

Liébard, A., DeHerde, A. (2005). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques : concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*. Paris, Le Moniteur, 776 p.

Martins, T., Adolphe, L., Bonhomme, M., Bonneaud, F., Faraut, S., Ginestet, S., Michel, C., Guyard, W. (2016). Impact of Urban Cool Island measures on outdoor climate and pedestrian comfort: Simulations for a new district of Toulouse, France. *Sustainable Cities and Society*, 26 : 9-26.

Météo France, (2021). [En ligne](#).

Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie (2012). *Explore 2070 Eau et changement climatique, prospective socio-économique et démographique, pressions anthropiques*.

Mullaney, J. (2015). Using permeable pavements to promote street tree growth. University of the Sunshine Coast, Queensland. Thèse.

Nabucet J. (2018). Apport des données de télédétection à très haute

résolution spatiale pour la cartographie de la végétation en milieu urbain. En ligne.

Nowak D., Hirabayashi, S., Doyle, M., McGovern, M., Pasher, J. (2018). Air pollution removal by urban forests in Canada and its effect on air quality and human health. *Urban Forestry & Urban Greening*, 29 (2018) 40–48.

Oke, T., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. (2017). *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781139016476
Oke, T. (1973). City Size and the Urban Heat Island. *Atmospheric Environment*, 7 : 769 – 779.

ONU, (2018). *World Urbanization Prospect*.

Prado, R. T. A., Ferreira, F. L. (2005). Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. *Energy and Buildings*, 37(4), 295–300.

Projet HUT : l'architecture du projet HUT est consultable en ligne.

Programme Architectures Dynamiques et Reconfigurables pour les systèmes Embarqués Autonomes Mobiles (LAAS - ADREAM)

Rankovic, A., Pacteau C., Abbadie, L. (2012). Services écosystémiques et adaptation urbaine interscalaire au changement climatique : un essai d'articulation. *Vertigo*.

Sannier M., Janaqi S., Barysheva V., Raducanu V., Ait Haddou H., Dray G., Bardy, B. G. (2021). Reconstructing locomotor trajectories at home from a sensing floor, INSHS - Saint Petersburg.

Shi, Y., Skidmore, A. K., Wang, T., Holzwarth, S., Heiden, U., Pinnel, N., Zhu, X., Heurich, M. (2018). Tree species classification using plant functional traits from LiDAR and hyperspectral data. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation*, 73 : 207-219.

Synnefa, A., Dandou, A., Santamouris, M., Tombrou, M., Soulakellis, N. (2008). On the Use of Cool Materials as a Heat Island Mitigation Strategy. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 47, 11:2846-2856. En ligne.

Tornay N., Schoetter, R., Bonhomme, M., Faraut, S., Lemonsu, A., Masson, V. (2017). GENIUS: A methodology to define a detailed description of buildings for urban climate and building energy consumption simulations. *Urban Climate*, 10 : 75-93.

Tremeac, B., Bousquet, P., de Munck, C., Pigeon, G., Masson, V., Marchadier, C., Merchat, M., Poef, P., Meunier, F. (2012). Influence of air conditioning management on heat island in Paris air street temperatures. *Applied Energy*, 95 : 102 – 110.

Zhou, D., Xiao, J., Bonafoni, S., Berger, C., Deilami, K., Zhou, Y., Frolking, S., Yao, R., Qiao, Z., Sobrino, J. (2019). Satellite Remote Sensing of Surface Urban Heat Islands: Progress, Challenges, and Perspectives. *Remote Sensing*, 11:10.3390/rs11010048.

6. Milieux littoraux

André C., Sauboua P., Rey-Valette H., Schauner G. (2015). Acceptabilité et mise en œuvre des politiques de relocalisation face aux risques littoraux : perspectives issues d'une recherche en partenariat, *Vertigo* - la revue électronique en sciences de l'environnement. 15:1. [En ligne](#).

Artelia (2011). Actualisation de l'aléa érosion sur le littoral du Languedoc-Roussillon. Rapport N1713060–OCTOBRE 2011, 78 p.

Bec, B., Derolez, V., Soudant, D., Cesmat, L., Pete, R., Richard, M. (2018). Projet CAPATHAU : Capacité trophique de la lagune de Thau. Evolution temporelle de l'état écologique de la lagune de Thau et des performances des coquillages en élevage au regard de la réduction des apports issus du bassin versant et des changements météo.

Bec, B., Husseini-Ratrema, J., Collos, Y., Souchu, P., Vaquer, A. (2005) Phytoplankton seasonal dynamics in a Mediterranean coastal lagoon:

emphasis on the picoeukaryote community. *Journal of Plankton Research*, 27:881–894.

Bianchi, TS, Aller, R.C., Atwood, T.B., Brown, C.J., Buatois, L.A., Levin, L.A., JefLevinton, J.S., Middelburg, J.J., Morrison, E.S., Regnier, P., Shields, M.R., Snelgrove, P.V.R., Sotka, E.E., Stanley, R.R.E. (2021). What global biogeochemical consequences will marine animal–sediment interactions have during climate change? *Elem Sci Anth*, 9:1. [En ligne](#).

Breitburg, D., Levin, L. A., Oschlies, A., Grégoire, M., Chavez, F. P., Conley, D. J., ... Zhang, J. (2018). Declining oxygen in the global ocean and coastal waters. *Science*, 359(6371). [En ligne](#).

BRGM. (2013) – MISEEVA. Méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité de la zone côtière du Languedoc-Roussillon face à la submersion marine : élaboration d'indicateurs de vulnérabilité socio-économiques et environnementaux Rapport final. BRGM/RP-60980-FR. 160 p., 32 fig., 5 tabl., 11 ann.

Brunel, C., Certain, R., Robin, N., Aleman, N., Raynal, O., avec la collaboration de Guerinel, B. et Dufresne, P. (2014) –REVOLSED : « Relation entre l'évolution du traitde côte et le bilan sédimentaire de l'avant-côte du Languedoc-Roussillon ». Rapport final.

Buchou S. (2019). Quel littoral pour demain ? Vers un nouvel aménagement des territoires côtiers adapté au changement climatique. Rapport remis à Monsieur le Premier Ministre et à Madame la Ministre de la Transition Écologique et Solidaire, 113p. [En ligne](#).

CEREMA (2018). [Indicateur national d'érosion côtière](#).

Chachadi, A. G., Lobo-Ferreira, J. P. (2005). Assessing aquifer vulnerability to sea- water intrusion using GALDIT method: Part 2 – GALDIT Indicator Descriptions. IAHS and LNEC, Proceedings of the 4th The Fourth Inter Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources, held at Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, July 11- 13, 2005.

Chachadi, A. G., Lobo-Ferreira, J. P. (2001). Sea water intrusion vulnerability mapping of aquifers using GALDIT method. Proc. Workshop on modelling in hydrogeology, Anna University, Chennai, pp.143-156, and in COASTIN A Coastal Policy Research Newsletter, Number 4, March 2001. New Delhi, TERI, pp. 7-9.

Clément V., Rey-Valette H., Rulleau B. (2015). Perceptions on equity and responsibility in coastal zone policies. *Ecological Economics*, 119, 284-291.

Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J.-P., Iglesias, A., Lange, M.A., Lionello, P., Llasat, M.C., Paz, S., Peñuelas, J., Snoussi, M., Toreti, A., Tsimplis, M.N., Xoplaki, E., 2018. Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change* 8:972. [En ligne](#).

Collos, Y., Bec, B., Jauzein, C., Abadie, E., Laugier, T., Lautier, J., Pastoureaud, A., Souchu, P., Vaquer, A. (2009) Oligotrophication and emergence of picocyanobacteria and a toxic dinoflagellate in Thau lagoon, southern France. *Journal of Sea Research*. [En ligne](#).

Dachary-Bernard J., Rey-Valette H., Rulleau B. (2019). Refining the analysis of coastal and hinterland community preferences for attributes of managed retreat: the key-role of risk perception. *Journal of Environmental Management*, 232, 772-780.

De Wit, R., Leruste, A., Le Fur, I., Sy, M.M., Bec, B., Ouisse, V., Derolez, V., Rey-Valette, H. (2020). A Multidisciplinary Approach for Restoration Ecology of Shallow Coastal Lagoons, a Case Study in South France. *Frontiers in Ecology and Evolution* 8:108. [En ligne](#).

Derolez, V., Malet, N., Fiandrino, A., Lagarde, F., Richard, M., Ouisse, V., Bec, B., Aliaume, C. (2020a). Fifty years of ecological changes: regime shifts and drivers in a coastal Mediterranean lagoon during oligotrophication. *Science of the Total Environment* 732. [En ligne](#).

Derolez, V., Soudant, D., Malet, N., Chiantella, C., Richard, M., Abadie, E., Aliaume, C., Bec, B. (2020b). Two decades of oligotrophication:

evidence for a phytoplankton community shift in the coastal lagoon of Thau (Mediterranean Sea, France). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 241.

Desmazes, Maspataud, Billy et al. (2020). Effet du changement climatique sur le recul du trait de côte. Rapport BRGM RP-67403-FR

Dörfliger, N., Schomburgk, S., Bouzid, M., Petit, V., Caballero, Y., Durst, P., Douez, O., Chatelier, M., Croiset, N., Surdyk, N. (2011). Montée du niveau marin induite par le changement climatique : Conséquences sur l'intrusion saline dans les aquifères côtiers en Métropole. Rapport intermédiaire, BRGM RP-60829-FR, 302. [En ligne](#).

Duarte, C.M. et al. (2013). Is Ocean Acidification an Open-Ocean Syndrome? Understanding Anthropogenic Impacts on Seawater pH. *Estuaries and Coasts* 36:221-236

FAO. (2020). The State of Mediterranean and Black Sea Fisheries 2020. The Food and Agriculture Organization of the United Nations and the General Fisheries Commission for the Mediterranean. Roma.

Feuilletoy, G., J.-M. Fromentin, L. Stemmann, H. Demarcq, C. Estournel, and C. Saraux. (2020). Concomitant changes in the environment and small pelagic fish community of the Gulf of Lions. *Progress In Oceanography* 186:102375.

Fromentin, J.-M., S. Bonhommeau, H. Arrizabalaga, and L. T. Kell. (2014). The spectre of uncertainty in management of exploited fish stocks: The illustrative case of Atlantic bluefin tuna. *Marine Policy* 47:8-14.

Fromentin, J.-M., and J. E. Powers. (2005). Atlantic bluefin tuna: population dynamics, ecology, fisheries and management. *Fish and Fisheries* 6:281-306.

Hérivaux C., Rey-Valette H., Agenais A.L., Grisel M., Kuhfuss L. Maton L. Rulleau B., Vinchon C. (2018). Valuing the environmental and economic impacts of sea level rise and extreme flooding at the regional scale: an application to the French Mediterranean Regional Environmental Change, 1-14.

Hilborn R, Amoroso RO, Anderson CM, Baum JK, Branch TA, Costello C, de Moor CL, Faraj A, Hively D, Jensen OP, Kurota H, Little LR, Mace P, McClanahan T, Melnychuk MC, Minto C, Osio, A. M. Parma, M. Pons, S. Segurado, C. S. Szuwalski, J. R. Wilson, and Y. Ye (2020). Effective fisheries management instrumental in improving fish stock status. *Proc. of the National Academy of Sciences* 117:2218-2224.

ICCAT (2013). Report of the 2012 Atlantic Bluefin Tuna Stock Assessment Session. Collective Volume of Scientific Papers ICCAT 69:1-198.

ICCAT (2018). Report of the 2017 Atlantic Bluefin Tuna Stock Assessment Session. Collective Vol. of Scientific Papers ICCAT 74:2372.

Isensee, K., Levin, L. A., Breitburg, D., Gregoire, M., Veronique, G., & Valdes, L. (2015). The Ocean is Losing its Breath. *Ocean and Climate Scientific Notes*, ed 2, 20-31.

Jackson, J. B. C., M. X. Kirby, W. H. Berger, K. A. Bjorndal, L. W. Botsford, B. J. Bourque, R. H. Bradbury, R. Cooke, J. Erlandson, J. A. Estes, T. P. Hughes, S. Kidwell, C. B. Lange, H. S. Lenihan, J. M. Pandolfi, C. H. Peterson, R. S. Steneck, M. J. Tegner, and R. R. Warner. (2001). Historical Overfishing and the Recent Collapse of Coastal Ecosystems. *Science* 293:629-637.

Lagarde, F., Atteia, A., Gobet, A., Richard, M., Mostajir, B., Roques, C., Foucault, É., Messiaen, G., Hubert, C., Cimiterra, N., Derolez, V., Bec, B. (2021). Phénomène d'Eaux Vertes à Picochlorum en lagune de Thau pendant les années 2018 et 2019. Observations environnementales. [En ligne](#).

Lasram, F., Guilhaumon, F., Albouy, C., Thuiller, W., Mouillot, D. (2010). The Mediterranean Sea as a 'cul-de-sac' for endemic fishes facing climate change. *Global Change Biology* : 16, 3233-3245. [En ligne](#).

Lenoir, J., Bertrand, R., Comte, L., Bourgeaud, L., Hattab, T., Murienne, J., Grnouillet, G. (2020). «Species better track climate warming in the

oceans than on land.» *Nature Ecology & Evolution* : 1-16.

Lupo C., Dutta Bhagat L., Petton S., Ezanno P., Tourbiez D., Travers M.A., Pernet F., Bacher C. (2020). Spatial epidemiological modelling of infection by *Vibrio aestuarianus* shows that connectivity and temperature control oyster mortality. *Aquaculture Environment Interactions*, 12, 511-527. [En ligne](#).

Marbà, N., G. Jorda, S. Agusti, C. Girard, and C. M. Duarte. (2015). Footprints of climate change on Mediterranean Sea biota. *Frontiers in Marine Science* 2:2296-7745.

MedECC, (2020). Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin – Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report [Cramer, W., Guiot, J., Marini, K. (eds.)] Union for the Mediterranean, Plan Bleu, UNEP/MAP, Marseille, France, 600 pp, in press.

Moullec, F. Ben Rais Lasram, F., Coll, M., Guilhaumon, M., Halouani, G., Hattab, T., Le Loc'h, F., Shin Y.-J (2016). Climate change impacts on marine resources: from individual to ecosystem responses. In Thiébaud S., Moatti, J.-P., The Mediterranean region under climate change: a scientific update, IRD Éditions; AllEnvi, pp.229-248, Synthèses, 978-2-7099-2219-7. hal-02569960

Moullec, F., Barrier, N., Drira, S., Guilhaumon, F., Hattab, T., Peck, M.A., Shin, Y.-J. (en revision) Using species distribution models only may underestimate climate change impacts on future marine biodiversity.

Moullec, F., Barrier, N., Drira, S., Guilhaumon, F., Luján, C., Ulses, C., Peck, M.A., Shin Y.-J. (en révision) Rebuilding Mediterranean marine resources under climate change.

Moullec, F., Barrier, N., Drira, S., Guilhaumon, F., Marsaleix, P., Somot, S., Ulses, C., Velez, L., Shin, Y.-J. (2019). An End-to-End Model Reveals Losers and Winners in a Warming Mediterranean Sea. *Front. Mar. Sci.* 6:345. doi: 10.3389/fmars.2019.00345

Palvadeau, E., Fleury, P., Valentini, N. (2021). Vers une stratégie de conservation à long terme des roselières littorales d'Occitanie - Rapport Axe 3 - Volet hydrogéologique et volet Submersion. Rapport final. BRGM/RP-70715-FR, 127 p., 66 ill., 2 ann.

Pearson, TH, Rosenberg, R. (1978). Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanography Marine Biology Annual Review* 16: 229-311.

Pita, I., Mouillot, D., Moullec, F., Shin, Y.-J. (2021) Contrasted patterns in climate change risk for Mediterranean fisheries. *Global Change Biology*. 10.1111/gcb.15814

Pörtner, H.O. et al. (2021): IPBES-IPCC co-sponsored workshop report on biodiversity and climate change; IPBES and IPCC. DOI:10.5281/zenodo.4782538.

Prigent, L. (2020). Étude de l'évolution saisonnière des communautés phytoplanctoniques présentes dans la lagune de Thau (Méditerranée/ Occitanie). Rapport de stage Master 2 Sciences pour l'Environnement section Gestion en Environnement et Écologie Littorale U. de La Rochelle. 57 p.

Rey-Valette H., Rocle N., Vye D., Mineo-Kleiner L., Longépée E., Lautrédou-Audouy N., Bazart C. (2019). Appropriation et acceptabilité sociale des mesures d'adaptation au changement climatique en zones côtières : revue de dix enquêtes en France métropolitaine, *VertigO*, 19:2.

Riedel B, Zuschin M, Stachowitsch M (2012) Tolerance of benthic macrofauna to hypoxia and anoxia in shallow coastal seas: a realistic scenario. *Mar Ecol Prog Ser* 458:39-52

Rulleau B., Rey-Valette H., Clément V. (2016). Impact of justice and solidarity on the acceptability of managed realignment, *Climate Policy*, DOI: 10.1080/14693062.2015.1119097

Sadaoui, M., Ludwig, W., Bourrin, F., Raimbault, P. (2016). Controls, budgets and variability of riverine sediment fluxes to the Gulf of Lions

(NW Mediterranean), *Journal of Hydrology*. [En ligne](#).

Sanz-Lázaro, C., Valdemarsen, T., Marín, A., Holmer, M. (2011). Effect of temperature on biogeochemistry of marine organic-enriched systems: implications in a global warming scenario. *Ecological Applications* 21, 2664-2677. [En ligne](#).

Saraux, C., E. Van Beveren, P. Brosset, Q. Queiros, J.-H. Bourdeix, G. Dutto, E. Gasset, C. Jac, S. Bonhommeau, and J.-M. Fromentin. (2019). Small pelagic fish dynamics: A review of mechanisms in the Gulf of Lions. *Deep-Sea Research Part II*. [En ligne](#).

Savva, I., Chartosia, N., Antoniou, C., Kleitou, P., Georgiou, A., Stern, N., Hadjioannou, L., Carlos Jimenez, C., Andreou, V., Hall-Spencer, J.M., Kletou, D. (2020). They are here to stay: The biology and ecology of the lionfish (*Pterois miles*) in the Mediterranean Sea. *Journal of Fish Biology*. [En ligne](#).

Shin, Y. -J. et al. (2019). Chapter 4: Plausible futures of nature, its contributions to people and their good quality of life. In: *Global assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services*. Brondízio, E. S., Díaz, S., Settele, J., Ngo, H. T. (eds). IPBES secretariat, Bonn, Germany. Doi:10.5281/zenodo.3832074.

Sutula, M., Green, L., Cicchetti, G., Detenbeck, N., & Fong, P. (2014). Thresholds of Adverse Effects of Macroalgal Abundance and Sediment Organic Matter on Benthic Habitat Quality in Estuarine Intertidal Flats. *Estuaries and Coasts*, 37(6), 1532-1548. [En ligne](#).

Trombetta T, Vidussi F, Mas S, Parin D, Simier M, Mostajir B (April 2019). Water temperature drives phytoplankton blooms in coastal waters. *PLOS ONE* 14(4):e0214933. [En ligne](#).

Trombetta T, Vidussi F, Roques C, Scotti M, Mostajir B (2020). Marine Microbial Food Web Networks During Phytoplankton Bloom and Non-bloom Periods: Warming Favors Smaller Organism Interactions and Intensifies Trophic Cascade. *Frontiers in Microbiology*. [En ligne](#).

Van der Geest M, Van der Heide T, Holmer M, and De Wit R (2020) First Field-Based Evidence That the Seagrass-Lucinid Mutualism Can Mitigate Sulfide Stress in Seagrasses. *Frontiers in Marine Science* 7:11. doi: 10.3389/fmars.2020.00011

Verge, S. A., Steinberg, P. D., Hay, M.E., Poore, A.G.B., Campbell, A.H., Ballesteros, E., Heck, K.L., Booth, D.J., Coleman, M.A., Feary, D.A., Figueira, W., Langlois, T., Marzinelli, E.M., Mizerek, T., Mumby, P.J., Nakamura, Y., Roughan, M., van Sebille, E., Gupta, A.S., Smale, D.A., Tomas, F., Wernberg, T., Wilson, S.K. (2014). The tropicalization of temperate marine ecosystems: climate-mediated changes in herbivory and community phase shifts. *Proc. R. Soc. B* 281: 20140846.

Zeebe, R. E., and D. Wolf-Gladrow (2001). CO₂ in seawater: equilibrium, kinetics and isotopes. Elsevier.

7. Milieux montagnards

Anderson, K., & Bows, A. (2008). Reframing the climate change challenge in light of post-2000 emission trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 366(1882), 3863-3882.

Bec, R. (2018), Gérer les crises liées au changement climatique en forêt du Haut-Languedoc (Projet LIFE FORECCAST), 19p.

Beguiría S., Campos P., Serrano R., Álvarez A. (2015) Producción, usos, renta y capital ambientales del agua en los sistemas forestales de Andalucía. En: Biodiversidad, usos del agua forestal y recolección de setas silvestres en los sistemas forestales de Andalucía (Campos P., Díaz M., eds). *Memorias científicas de RECAMAN. Volumen 2. Memoria 2.2*. Editorial CSIC, Madrid.

Bernardie, S. et al. (2021). *Natural Hazards and Earth System Sciences* 21: p147-169.

Bilan électrique Occitanie, 2020

Caballero, Y., S. Voirin-Morel, F. Habets, J. Noilhan, P. LeMoigne, A. Lehenaff, and A. Boone (2007), Hydrological sensitivity of the Adour-Garonne river basin to climate change, *Water Resour. Res.*, 43, W07448, doi:10.1029/2005WR004192.

Caballero, Y., and B. Ladouche. «Impact of climate change on groundwater in a confined Mediterranean aquifer.» *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 12.10 (2015): 10109-10156.

Climfourrel : Adaptation des systèmes fourragers et d'élevage péri-méditerranéens aux changements et aléas climatiques. (2007-2010)

Dumont, B., Andueza, D., Niderkorn, V., Luscher, A., Porqueddu, C., & Picon-Cochard, C. (2015). A meta-analysis of climate change effects on forage quality in grasslands: specificities of mountain and Mediterranean areas. *Grass and Forage Science*, 70(2), 239-254.

Estrada-Peña, A., Ayllón, N., & De La Fuente, J. (2012). Impact of climate trends on tick-borne pathogen transmission. *Frontiers in Physiology*, 3, 64.

European Environment Agency. (2017). *Climate change adaptation and disaster risk reduction in Europe - Enhancing coherence of the knowledge base, policies and practices*, 172p

Gauly, M., Bollwein, H., Breves, G., Brügemann, K., Danicke, S., Daş, G.... & Loholter, M. (2013). Future consequences and challenges for dairy cow production systems arising from climate change in Central Europe. 7(5), 843-859.

GIEC. (2019). *Rapport spécial du Giec sur l'océan, la cryosphère et les changements climatiques*

Giuntoli, I. et Renard, B. (2010). *Rapport ONEMA Cemagref: Identification des impacts hydrologiques du changement climatique: constitution d'un réseau de référence pour la surveillance des étages*.

Gong, C., Lei, Y., Ma, Y., Yue, X., & Liao, H. (2020). Ozone-vegetation feedback through dry deposition and isoprene emissions in a global chemistry-carbon-climate model. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(6), 3841-3857.

GREC-SUD et RECO. (2020). *Adaptation du Parc national des Cévennes au changement climatique et à ses impacts, ouvrage collectif co-édité par l'Association pour l'innovation et la recherche au service du climat (AIR Climat) et le Réseau d'expertise sur les changements climatiques en Occitanie (RECO)*, 56 p. ISBN : 978-2-491380-00-7

Hatt, E. et Vlès, V. (2014). *Mutations socio-environnementales et perspectives d'adaptation des stations de montagne pyrénéenne*, 13p

Hertig, E., Russo, A., & Trigo, R. M. (2020). Heat and Ozone Pollution Waves in Central and South Europe—Characteristics, Weather Types, and Association with Mortality. *Atmosphere*, 11(12), 1271.

INRAE. (2020). *La diversité génétique dans les prairies : un allié pour l'adaptation au changement climatique (communiqué de presse)*

Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN). (2016)

Jacob, D., Kotova, L., Teichmann, C., Sobolowski, S. P., Vautard, R., Donnelly, C.... & van Vliet, M. T. (2018). Climate impacts in Europe under + 1.5 C global warming. *Earth's Future*, 6(2), 264-285.

Jerez, S., Tobin, I., Vautard, R. et al. The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. *Nat Commun* 6, 10014 (2015). [En ligne](#).

Leip, A., Billen, G., Garnier, J., Grizzetti, B., Lassaletta, L., Reis, S.... & Westhoek, H. (2015). Impacts of European livestock production: nitrogen, sulphur, phosphorus and greenhouse gas emissions, land-use, water eutrophication and biodiversity. *Environmental Research Letters*, 10(11), 115004.

Lespinas F, Ludwig W, Heussner S (2014) Hydrological and climatic uncertainties associated with modeling the impact of climate change on water resources of small Mediterranean coastal rivers. *Journal of Hydrology* 511:403–422.

Lespinas, F., Ludwig, W. & Heussner, S. (2010). Impact of recent climate change on the hydrology of coastal Mediterranean rivers in Southern France. *Climatic Change* 99:425. [En ligne](#).

López-Moreno, J. I., Soubeyroux, J. M., Gascoin, S., Alonso-Gonzalez, E., Durán-Gómez, N., Lafaysse, M... & Morin, S. (2020). Long-term trends (1958–2017) in snow cover duration and depth in the Pyrenees. *International Journal of Climatology*, 40(14), 6122–6136.

Moraine, Association Pyrénéenne de Glaciologie. (2010)

Müller, J., Folini, D., Wild, M., & Pfenninger, S. (2019). CMIP-5 models project photovoltaics are a no-regrets investment in Europe irrespective of climate change. *Energy*, 171, 135–148.

Nature 2050, Cévennes, Revitaliser une forêt dépréciée

Nettier, B., Dobremez, L., Coussy, J. L., & Romagny, T. (2010). Attitudes of livestock farmers and sensitivity of livestock farming systems to drought conditions in the French Alps. *Journal of Alpine Research* | *Revue de géographie alpine*, (98-4).

Nogues-Bravo, D., M.B. Araujo, M.P. Errea, and J.P. Martinez-Rica. (2007). Exposure of Global Mountain Systems to Climate Warming during the 21st Century. *Global Environmental Change* 17(3–4): 420–428.

ONERC. (2020). Impacts du changement climatique : Montagne et Glaciers

OPCC, 2013. EFA 235/11. Acción Clima. Memoria final.

OPCC-CTP. (2018). Le changement climatique dans les Pyrénées: impacts, vulnérabilités et adaptation - Bases de connaissances pour la future stratégie d'adaptation au changement climatique dans les Pyrénées ISBN: 978-84-09-06268-3

OPCC-CTP. (2019). Résultats du projet OPCC2 et des autres projets associés: CLIM'PY, REPLIM, CANOPEE, FLORAPYR, PIRAGUA.

OPCC. (2021). Géoportail

PLANALP. (2016). Alpine strategy for adaptation to climate change in the field of natural hazards — Developed by the Platform on Natural Hazards of the Alpine Convention (PLANALP), Alpine Convention, Innsbruck, Austria.

Ponti, L., Gutierrez, A. P., Ruti, P. M., & Dell'Aquila, A. (2014). Fine-scale ecological and economic assessment of climate change on olive in the Mediterranean Basin reveals winners and losers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(15), 5598–5603.

de Pous, P., Montori, A., Amat, F., & Sanuy, D. (2016). Range contraction and loss of genetic variation of the Pyrenean endemic newt *Calotriton asper* due to climate change. *Regional environmental change*, 16(4), 995–1009.

Råman Vinnå, L., Medhaug, I., Schmid, M. & Bouffard D. (2020). Vulnerability of lakes to climate change along an altitudinal gradient.

Région Occitanie, Plan Montagnes 2018-2025

René, P. (2018). World Glacier Monitoring Service, Fluctuations of Glaciers Browser

Ribes, A., Thao, S., Vautard, R. et al. (2019). Observed increase in extreme daily rainfall in the French Mediterranean. *Clim Dyn* 52, 1095–1114. [En ligne](#).

Rico, I., Magnin F, Lopez-Moreno JI, Alonso E, Revuelto J, Serrano E. (2017). First evidence of permafrost occurrence in a steep rock wall in the Pyrenees: The Vignemale North Face.

Spandre, P., François, H., Verfaillie, D., Pons, M., Vernay, M., Lafaysse, M., George, E., Morin, S. (2019). Winter tourism under climate change in the Pyrenees and the French Alps: relevance of snowmaking as a technical adaptation

Toïgo, M., Barraquand, F., Barnagaud, J. Y., Piou, D., & Jactel, H. (2017). Geographical variation in climatic drivers of the pine processionary moth population dynamics. *Forest Ecology and Management*, 404, 141–155.

Tropé, M., Kieslich, M., Salles, J.-M. (2020). Analyse des enjeux liés au changement climatique dans les perceptions des paysages cévenols, dans GREC-SUD & RECO. (2020)

WWF France. (2021). Dérèglement climatique : le monde du sport à +2°C et +4°C, 64p.

Zampieri, M., Ceglar, A., Dentener, F., Toreti, A. (2017). Wheat yield loss attributable to heat waves, drought and water excess at the global, national and subnational scales. *Environmental Research Letters*. 12. 064008. 10.1088/1748-9326/aa723b.

8. Agrosystèmes

Aigrain, P., Bois, B., Brugière, F., Duchene, E., Garcia De Cortázar-Atauri, I., Gautier, J., Hannin, H., Ollat, N., Touzard, J.-M. (2021). Quelles actions pour la filière vigne et vin face au changement climatique ? Une sélection de propositions issues d'une démarche participative et de la consultation d'instances professionnelles, INRAE, 20 p. [En ligne](#).

AP3C (2018). Adaptation des Pratiques Culturelles au Changement Climatique. [En ligne](#).

APSEVIR (2015). Adaptation des plantes à la sécheresse et épidémiologie virale. *Projet Chercheur(se)s d'Avenir : soutien des projets de recherche interdisciplinaires ou novateurs dans les domaines S3*. Programme Européen FEDER-FSE, Région Languedoc-Roussillon.

Bergès, S. E., Vasseur, F., Bediée, A., Rolland, G., Masclef, D., Dautzat, M., van Munster, M., Vile, D. (2020). Natural variation of Arabidopsis thaliana responses to Cauliflower mosaic virus infection upon water deficit. *PLoS Pathog*, 16(5):e1008557. doi: 10.1371/journal.ppat.1008557. PMID: 32413076; PMCID: PMC7255604.

Bodner, G., Nakhforoosh, A., Kaul, H. P. (2015). Management of crop water under drought: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2):401–442.

Boyer J., Touzard J.-M. (2021). To what extent do an innovation system and cleaner technological regime affect the decision-making process of climate change adaptation? Evidence from wine producers in three wine clusters in France. *Journal of Cleaner Production*, 315, 1–13, [En ligne](#).

Brugière, F., Aigrain, P., Duchêne, E., Garcia De Cortazar Aauri, I., Gautier, J., Ollat, N., Giraud-Heraud, E., Hannin, H., Touzard, J.-M. (2016). Une prospective pour le secteur vignes et vins dans le contexte du changement climatique. *Les synthèses de FranceAgriMer*, 40, 21 p. [En ligne](#).

Champolivier, L. (2006). Irrigation du soja. *Perspectives Agricoles*, 324:89.

Clozier, A. (2018). Quels leviers d'autonomie fourragère face au changement climatique ? [En ligne](#).

Brisson N. et al. (2010). Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. *Le Livret Vert du projet CLIMATOR (2007-2010)*. ADEME, 336p.

Corrales, D. C., Schoving, C., Constantin, J., Raynal, H., Debaeke, P., Journet, E. P. (soumis) Application of feature selection techniques and regression models for soybean yield prediction in southern France.

Dayoub, E., Lamichhane, J. R., Schoving, C., Debaeke, P., Maury, P.

- (2021). Early-stage phenotyping of root traits provides insights into the drought tolerance level of soybean cultivars. *Agronomy-Basel*, 11:188.
- Delay E., Piou C., Quénon H., 2015. The mountain environment, a driver for adaptation to climate change. *Land Use Policy*, 48, pp.51-62.
- GIEC (2014). Changements climatiques 2014. Rapport de synthèse : contribution des groupes de travail I, II et III au cinquième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève (Suisse).
- Giuliano, S., Alletto, L., Deswarte, C., Perdrieux, F., Daydé, J., Debaeke, P. (en revision). Reducing herbicide use and leaching in agronomically performing maize-based cropping systems: an 8-year study.
- Graveline, N., Grémont, M., 2021. The role of perception, goals and characteristics of wine growers on irrigation adoption in the context of climate change. *Agricultural Water Management*. 250: 106837. [En ligne](#).
- Hannin, H., Touzard, J.-M., Aigrain, P., Bois, B., Brugière, F., Duchêne, E., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Gautier, J., Giraud Héraud, E., Hammond, R., Ollat, N. (2020). The french vineyard in the face of climate change: Developing an adaptation strategy based on prospective scenarios. In : *Wine management and marketing: Opportunities for companies and challenges for the industry*. Wiley-ISTE, 27-45. [En ligne](#).
- Hill, S. B., MacRae, R. J. (1996). Conceptual Framework for the Transition from Conventional to Sustainable Agriculture. *J. Sustain. Agric.*, 7:81-87. [En ligne](#).
- Initiative Clé Montpellier Université d'Excellence « Risques et Vecteurs » (2021). Évaluation de la variabilité génétique des traits viraux d'un Potyvirus transmis par puceron sur différents écotypes d'*Arabidopsis thaliana* en condition de déficit hydrique. KIM RIVE.
- Keep, T., Sampoux, J. P., Barre, P., Blanco-Pastor, J. L., Dehmer, K. J., Durand, J. L., Hegarty, M., Ledauphin, T., Muylle, H., Roldán-Ruiz, I., Roschanski, A. M., Ruttink, T., Surault, F., Willner, E., Volaire, F. (2021, en prep.). To grow or survive: which are the strategies of a perennial grass to face severe seasonal stress? *Functional Ecology*, 35:1145-1158.
- Kothari, K., Battisti, R. B., Boote, K. J., Archontoulis, S. V., Confalone, A., Constantin, J., Cuadra SV, Debaeke, P., Faye, B., Grant, B., Hoogenboom, G., Jing, Q., Van Der Laan, M., Macena Da Silva, F. A., Marin, F. R., Nehbandani, A., Nendel, C., Purcell, L. C., Qian, B., Ruane, A. C., Schoving, C., Silva, E. H. F. M., Smith, W., Soltani, A., Srivastava, A., Vieira Jr., N. A., Salmeron, M. (soumis). Model inter-comparison for soybean yield simulation under changing temperature and CO₂.
- Lamichhane, J. R., Aubertot, J. N. (2021). Effect of early and conventional sowings on soybean establishment quality, nodulation and early biomass development under inoculation with *Rhizoctonia solani*. *PhytoFrontiers*, doi:10.1094/PHYTOFR-12-20-0046-R.
- Lamichhane, J. R., Aubertot, J. N., Champolivier, L., Debaeke, P., Maury, P. (2020b). Analysis and modeling of germination and emergence of three soybean cultivars grown in Europe in relation to sowing dates and contrasted soil textures. *Frontiers in Plant Science*, 11:558855.
- Lamichhane, J. R., Constantin, J., Schoving, C., Maury, P., Debaeke, P., Aubertot, J. N., Dürr, C. (2020a). Analysis of soybean germination, emergence and prediction of a possible northward establishment of the crop under climate change. *European Journal of Agronomy*, 113:127972.
- Nendel, C., Reckling, M., Stella, T., Berg-Mohnicke, M., Constantin, J., Debaeke, P., Jaksic, S., Klimek-Kopyra, A., Schoving, C., Webber, H., Battisti, R. (2020). Future soybean productivity in Europe. Book of Abstracts, 2nd International Crop Modelling Symposium (iCROP2020), Crop Modelling for Agriculture and Food Security under Global Change, Montpellier, Feb. 3-5, 2020, pp 193-194.
- Norton, M., D. Malinowski, and F. Volaire. 2016. Plant drought survival under climate change and strategies to improve perennial grasses. A review. *Agronomy for Sustainable development*: 36:29-DOI 10.1007/s13593-13016-10362-13591.
- Nougier, M., Graveline, N., Laurent, J.-B., Tintinger M., Reynders S., Touzard J.-M. (2021). Collaboration et partage d'expérience à l'échelle méditerranéenne: un levier-clé de l'adaptation au changement climatique. *Revue des Oenologues*, (178), 13-14. [En ligne](#).
- Nougier, M., Graveline, N., Touzard, J.-M. (2020). Climathon® de Montpeyroux : comment pérenniser les vignobles et les vignerons de Montpeyroux face aux évolutions climatiques et sociétales, INRAE, 34 p. [En ligne](#).
- Nougier, M., Touzard, J.-M. (2018). Le Climathon® de Murviel-lès-Montpellier : collaborations entre scientifiques, professionnels et citoyens pour l'adaptation d'un vignoble local au changement climatique, INRAE, 30 p. [En ligne](#).
- Ojeda, H., Saurin, N., 2014, L'irrigation de précision de la vigne : méthodes, outils et stratégies pour maximiser la qualité et les rendements de la vendange en économisant de l'eau. *Innovations Agronomiques* 38 : 97-108.
- Ollat, N., Touzard, J.-M. (2014). Adaptation à long terme au changement climatique pour la viticulture et l'oenologie : un programme de recherche sur les vignobles français. *Revue des oenologues et des techniques vitivinicoles et oenologiques*, 41:152, pp.11-12.
- Ollat, N., Touzard, J.-M. (2014). Long-term adaptation to climate change in viticulture and enology. *Journal International des Sciences de la Vigne et du Vin*, 1-7. [En ligne](#).
- Ollat, N., Touzard, J.-M., Van Leeuwen, C. (2016). Climate change impacts and adaptations: new challenges for the wine industry. *Journal of Wine Economics*, 11 (1), 139-149. [En ligne](#).
- Parent, B., Leclere, M., Lacube, S., Semenov, M. A., Welcker, C., Martre, P., Tardieu, F. (2018). Maize yields over Europe may increase in spite of climate change, with an appropriate use of the genetic variability of flowering time. *PNAS*, 115 (42), 10642-10647.
- Poirier, M., J. L. Durand, and F. Volaire. 2012. Persistence and production of perennial grasses under water deficits and extreme temperatures: importance of intraspecific vs. interspecific variability. *Global Change Biology* 18:3632-3646.
- Porter, J. R., L. Xie, A. J. Challinor, K. Cochrane, S. M. Howden, M. M. Iqbal, D. B. Lobell, Travasso, M. I. (2014). Food security and food production systems. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 485-533.
- Pret V., Simonneau T., Hanin H. (2021). Etude de l'impact du pic de chaleur du 28 juin 2019 sur les vignobles de l'Hérault et du Gard. Inrae, Institut Agro, DDTM34. 108 p.
- Projet LIFE AgriAdapt, (2020) :
- Métayer, N., Solgaro (2020). Caractériser la vulnérabilité au changement climatique d'exploitations agricoles afin d'identifier des actions d'adaptation durables. ADEME, 45 p.
- Layman report (2020). LIFE AgriAdapt : Adaptation durable des systèmes agricoles de l'Union Européenne au changement climatique, rapport.
- Manuel AgriAdapt (2020). 12 cas d'études de fermes en grandes cultures, élevage et viticulture, rapport.
- Schoving, C. (2020). Analyse écophysiological et modélisation dynamique des interactions génotype x environnement x conduite de culture chez le soja. Thèse INP Toulouse.
- Schoving, C., Stöckle, C., Colombet, C., Champolivier, L., Debaeke, P., Maury, P. (2020). Combining simple phenotyping and photothermal algorithm for the prediction of soybean phenology: application to a range of common cultivars grown in Europe. *Frontiers in Plant Science*,

10:1755.

Thénard, V. (2021). Accompagner la transition agroécologie en élevage. I les Lundis Pédagogie d'Agreenium.

Thénard, V., Aguirre Anelli, G., Experton, C., Gressier, E., Vallas, M. (2015). Les Systèmes fourragers Bio en régions méditerranéennes : des pistes d'adaptation pour l'élevage français face au réchauffement climatique. 22, Rencontres autour des Recherches sur les Ruminants, Paris, France. 1 p. hal-02739166

Touzard, J.-M., Ollat, N., Aigrain, P., Bois, B., Brugiere, F., Duchêne, E., Garcia De Cortazar-Atauri, I., Gautier, J., Hammond, R., Hannin, H. (2020). La filière Vigne et Vin face au changement climatique : enseignements d'un forum de prospective pour le Val de Loire. *Norois*, 2 (255), 83-89. [En ligne](#).

van Munster, M., Yvon, M., Vile, D., Dader, B., Fereres, A., Blanc, S. (2017). Water deficit enhances the transmission of plant viruses by insect vectors. *PLoS ONE* 12(5): e0174398. [En ligne](#).

Volaire, F. (2018). A unified framework for plant adaptive strategies to drought : across scales and disciplines. *Global Change Biology*, 24 : 2929-2938. [En ligne](#).

Volaire, F., and M. Norton. 2006. Summer dormancy in perennial temperate grasses. *Annals of Botany* 98:927-933.

Yvon, M., Vile, D., Brault, V., Blanc, S., van Munster, M. (2017). Drought reduces transmission of Turnip yellows virus, an insect-vectored circulative virus. *Virus Research*. [En ligne](#).

Wolkovich, E.M., García de Cortázar-Atauri, I., Morales-Castilla, I. et al. (2018). From Pinot to Xinomavro in the world's future wine-growing regions. *Nature Clim Change* 8, 29–37. [En ligne](#).

9. Tourisme

Abegg, B., Morin, S., Demiroglu, O. C., François, H., Rothleitner, M., Strasser, U. (2020). Overloaded! Critical revision and a new conceptual approach for snow indicators in ski tourism. *Int. J. Biometeorol.* [En ligne](#).

Achin, C. (2015). La gouvernance de la diversification comme enjeu de l'adaptation des stations de moyenne montagne : l'analyse des stations de la Bresse, du Dévoluy et du Sancy. Thèse de doctorat en Sciences du Territoire, Université Grenoble Alpes.

Achin, C., George, E., François, H., Bray, F., Torre, A. (2018). La diversification touristique dans le massif alpin : une lecture au prisme du dispositif « Espaces Valléens ». Rapport du projet EValoscope mené par Inrae-LESSEM pour le compte du massif des Alpes, 69 p.

ADEME Bretagne, (2017). Comment être acteur de la mobilité de sa clientèle ? 111 p.

ANMSM, (2007). Charte nationale en faveur du développement durable dans les stations de montagne. [En ligne](#).

Atout France, (2015). La réhabilitation de l'immobilier de loisir dans les stations de montagne.

Atout France, (2020). Expérimentation nationale sur la réhabilitation de l'immobilier de loisir et la transition énergétique des stations. [En ligne](#).

Bachimon, P., Dério, P., Viès, V. (2016) Le dédoublement résidentiel, descripteur des bifurcations des trajectoires des stations de montagne, dans Viès, V., Bouneau, C. (2016). Stations en tension, Bruxelles : Peter Lang.

Commissariat du massif des Pyrénées (CMP), (2007). Convention d'application de la convention interregionale de massif des Pyrénées 2007-2013 - Recherche d'un équilibre durable de l'offre touristique pyrénéenne.

Destination Occitanie, (2020a). Mémento du tourisme en Occitanie : chiffres clés 2019.

Destination Occitanie, (2020b). Comportements, Satisfaction, Dépenses des visiteurs en Occitanie. Rapport d'étude - 1er épisode. NB : les données sur les transports proviennent d'une enquête en ligne réalisée par le Comité Régional du Tourisme et des Loisirs d'Occitanie (CRTLO) auprès de 14291 français : la population enquêtée diffère donc de celle des données sur les nuitées touristiques et la prise en compte des touristes étrangers modifierait sans doute les parts modales mesurées, augmentant probablement celle de l'avion.

Diamant, C., Dugast, C., Nguyen, B.-T., Sorret, J. (2020). Évaluation des externalités générées par les mobilités touristiques en France à l'horizon 2030. *ADEME*, vol. 2, 82 p.

François, H. (2008). Durabilité des ressources territoriales et tourisme durable : vers quelle convergence ? *Géographie, Économie, Société*, 10:1, pp 133-152. doi:10.3166/ges.10.133-152

George-Marcelpoil, E., Achin, C., Fablet, G., François, H. (2016). Entre permanences et bifurcations : une lecture territoriale des destinations touristiques de montagne. *Mondes du tourisme*. doi:10.4000/tourisme.1237

GIEC, (2019). Summary for Policymakers, dans IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.).

Hagimont, S. Viès, V., Minovez, J.-M. (2021). Les sports d'hiver dans leurs territoires. A la croisée des enjeux politiques, économiques et environnementaux (du début XXe à nos jours). Numéro spécial de Sud-Ouest européen, (à paraître).

Hagimont, S. (2021). Pyrénées. Une histoire environnementale (Fin XVIIIe-XXIe siècle, France, Espagne). Seyssel, Champ Vallon (à paraître).

Hatt, E. (2019), Refaire la station sur la station. *Urbanisme*, n°411, p.38-41. [En ligne](#).

Idt, J., Meunier, J.-M., Renou, L. (2021, à paraître). Marseillan, petite ville sous contraintes de fluctuations démographiques touristiques. Collection les cahiers POPSU.

Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Deque, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kroner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., Meijgaard, E. V., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg. Environ. Change*, 14, 563–578. [En ligne](#).

López-Moreno, J. I., Soubeyroux, J.-M., Gascoin, S. et al. (2020). Long-term trends (1958–2017) in snow cover duration and depth in the Pyrenees. *Int J Climatol.*, 40: 6122–6136. [En ligne](#).

Rey-Valette, H., Rulleau, B., Balouin, Y., Hérivaux, C. (2016). Enjeux, valeurs des plages et adaptation des territoires littoraux à la submersion marine. *Économie rurale*, 351, 49-65.

Rocci, A. (2014). Agir sur toute la chaîne de déplacement pour réduire l'usage touristique de la voiture. *Espaces*, 231, 127-135.

Rouch, L. (2021). Les dynamiques relationnelles de la diversification de l'offre touristique en moyenne montagne : vers la création de systèmes touristiques diversifiés ? Communication au Colloque Angers, Territoires et trajectoires de développement : les dynamiques relationnelles comme clé d'analyse renouvelée.

Spandre, P., François, H., Verfaillie, D., Pons, M., Vernay, M., Lafaysse,

M., George, E., Morin, S. (2019). Winter tourism under climate change in the Pyrenees and the French Alps: relevance of snowmaking as a technical adaptation. *The Cryosphere*, 13, 1325-1347. [En ligne](#).

Spandre, P., H. François, H., Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., George, E., Morin, S. (2019). Climate controls on snow reliability in French Alps ski resorts. *Sci. Rep.*, 9 : 8043. [En ligne](#).

Spandre, P., Morin, S., Lafaysse, M., Lejeune, Y., François, H., George-Marcelpoil, E. (2016). Integration of snow management processes into a detailed snowpack model. *Cold Reg. Sci. Technol.*, 125, 48-64. [En ligne](#).

Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., Lejeune, Y., Morin, S. (2018). Multi-component ensembles of future meteorological and natural snow conditions for 1500 m altitude in the Chartreuse mountain range, Northern French Alps. *The Cryosphere*, 12, 1249-1271. [En ligne](#).

Vernay, M., Lafaysse, M., Hagenmuller, P., Nheili, R., Verfaillie, D., Morin, S. (2019). The S2M meteorological and snow cover reanalysis in the French mountainous areas (1958 - present). Data set, AERIS. [En ligne](#).

Viès, V. (2019). Des territoires touristiques en transition, aux abords du point de bascule, dans Carrere, G., Dumas, C., Zelem, M.-c. (Ed), *Dans la fabrique des transitions écologiques*, Paris : L'Harmattan, pp. 75-98.

10a. Mobilité

ADEME, (2019). La Mobilité en 10 questions. Des transports plus durables et plus accessibles. 13 p.

ADEME, (2018). Chiffres clés. [En ligne](#).

Autorité de régulation des transports, (2018). Le Marché français du transport ferroviaire de voyageurs. 84 p.

Bigo, A. (2021). Webinaire transition énergétique dans les transports. FUB. [En ligne](#).

Bigo, A. (2020). Stratégie nationale bas-carbone : peut-on faire l'économie d'un ralentissement des mobilités ? *Forum Vies Mobiles*. [En ligne](#).

Brand, C., et al. (2021). The climate change mitigation effects of daily active travel in cities. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 93.

Carrouet, G. (2018). Dégradation de la desserte ferroviaire interurbaine et périphérisation du département des Pyrénées-Orientales. *Les cahiers scientifiques du transport*, 74 : 3-28.

CITEPA, (2019). Synthèse du rapport Secten. 14 p.

Comité Régional du Tourisme Occitanie, (2020). Comportements, Satisfaction, Dépenses des visiteurs en Occitanie. Rapport d'étude – 1er épisode, en ligne. Enquête Comportements, Satisfaction, Dépenses des visiteurs en Occitanie (CSD) réalisée auprès d'un panel de 14 291 français ayant séjourné en Occitanie entre juillet 2018 et septembre 2019.

Comité Régional du Tourisme Occitanie, (2020). Enquête 15-25ans#o-nattendqueto. Rapport d'étude, 108 p., [en ligne](#). Enquête réalisée auprès de 3117 Français âgés de 15 à 25 ans en 2020.

Comité Régional du Tourisme Occitanie, (2020). Tourisme durable. Restitution de l'enquête auprès des acteurs du tourisme d'Occitanie sur leurs pratiques et attentes en matière de Tourisme Durable, 60 p., [en ligne](#). Enquête réalisée au printemps 2020 auprès de 2876 acteurs du tourisme en Occitanie.

Dugot, P. et Revelli, B. (2021). Building a Smarter City with a "Mobility Oriented Management" : The Toulouse COMMUTE Project. In Sajous P., Bertelle C., *Complex Systems, Smart Territories and Mobility*, Springer, pp 91-108.

Durif, F., François-Lecompte, A., Prim-Allaz I. (2017). Pratiques de tourisme durable : proposition d'une typologie croisée avec les comportements de consommation. *Téoros*, 36. [En ligne](#).

Duron, P. (2015). Trains d'Equilibre du Territoire. Agir pour l'avenir. Commission TET, 117 p.

Frétigny, J.-B., Gay, C., Landriève, S., Offner, J.-M. (2020). Limiter l'empreinte carbone des mobilités : la France se donne-t-elle les moyens de respecter ses engagements ? *Forum Vies Mobiles*. [En ligne](#).

Guelton, S. et Poinot, P. (2020). La gratuité des réseaux de transports collectifs urbains : un modèle de financement particulier ? *Transports Urbains*, 136 : 12-17.

HCC (Haut Conseil Pour le Climat), (2020). Redresser le cap, relancer la transition. Rapport du Haut Conseil Pour le Climat.

Huré, M. et Javary, C.-M. (2019). Le nouveau réseau de transport gratuit à Dunkerque. De la transformation des mobilités aux mutations du territoire. Rapport de recherche pour l'AGUR et la CUD, p. 15.

Massot, M.-H. (2002). Paris 21. Rapport de recherche de l'IFSTTAR/INRETS.

Maulat, J. (2016). Le rôle de la planification territoriale dans la coordination des politiques d'urbanisme et de transport ferroviaire régional à l'échelle métropolitaine. L'exemple toulousain. *Riurba*, n°2. [En ligne](#).

Maulat, J. (2015). Contractualiser pour coordonner urbanisme et transport ? Regards croisés sur quatre expériences de contrats d'axes ferroviaires. *Flux*, 101-102 : 82-98. [En ligne](#).

Ministère de l'Economie des Finances et de la Relance, (2017). Les déplacements touristiques des Français. Memento du tourisme, [en ligne](#). Enquête Suivi de la Demande Touristique (SDT) réalisée auprès d'un panel de 20 000 personnes en 2016. Les chiffres donnés correspondent aux voyages pour motifs personnels en France métropolitaine.

Munafò, S. (2016). La ville compacte remise en cause ? Formes urbaines et mobilités de loisirs. Editions Alphil-Presses Universitaires Suisses, 442 p. [En ligne](#).

Observatoire des villes du transport gratuit, (2021). [En ligne](#).

Puchczewski, R., Doucet, C., Wolff, J.-P. (2019). La dynamique cyclable dans les politiques de mobilité de l'agglomération toulousaine : des discontinuités d'itinéraires au Réseau Express Vélo. *Géotransports*, 12-13.

Tisséo Collectivités, (2019). Schéma Directeur Cyclable de l'Agglomération Toulousaine.

Tortel, F., Jouannot, T. (2016). Réseau cyclable à haut niveau de service. Objectifs et principes d'aménagement. Cerema.

Transports urbains, (2020). La gratuité en débat. Numéro spécial, n°136.

Zembri, P. (2017). Trains intercités, réseaux et territoires en France. *Géotransports*, 10 : 5-21.

10b. Énergie

Béghin-Tanneau, R., Guérin, F., Guiresse, M., Kleiber, D., Scheiner, J.D. (2019). Carbon sequestration in soil amended with anaerobic digested matter. *Soil and Tillage Research*, 192:87-94. [En ligne](#).

Chenu, C., Angers, D. A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D., Balesdent, J. (2019). Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. *Soil and Tillage Research, Soil Carbon and Climate Change: the 4 per Mille Initiative*, 188:41-52. [En ligne](#).

Hendrickx F, Sauquet E. (2013). Impact of warming climate on water

management for the Ariège river basin (France). *Hydrological Sciences Journal*, doi: 10.1080/02626667.2013.788790.

Huang et al. (2021). En cours de publication.

Möller, K., Müller, T. (2012). Effects of anaerobic digestion on digestate nutrient availability and crop growth: A review. *Engineering in Life Sciences*, 12:242–257. [En ligne](#).

Sauquet et al. (2010). IMAGINE 2030, climat et aménagements de la Garonne : quelles incertitudes sur la ressource en eau en 2030 ? Rapport final, Irstea, pp.149. [En ligne](#).

Scariat, N., Dallemand, J.-F., Fahl, F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, 129:457–472. [En ligne](#).

11. Gouvernance

Aykut, S. C., et Dahan-Dalmédico, A. (2014). Gouverner le climat ? : vingt ans de négociations internationales. Paris: Presses de Sciences Po.

Bailleul, L. (2017). Gouvernance, innovation et territoires. La production des Schémas Régionaux de la Région Occitanie, mémoire de recherche de master, IEP de Toulouse.

Barone, S., Michel, L. (2022), à paraître). Risques littoraux et métropole montpelliéraine. De l'impensé métropolitain à la gouvernance interterritoriale ?, éditions Autrement.

Barone, S., et Michel, L. (2021). Littoral : la consécration paradoxale. In *La fusion des régions*, Le Laboratoire d'Occitanie. PUG.

Barone, S., Mayaux, P.-L. et Guerrin, J. (2018). Introduction. Que fait le New Public Management aux politiques environnementales?. *Pôle Sud*, 2018, no 1, p. 5-25.

Béal, V., Pinson, G. (2013). Gouvernance et durabilité sont-elles (encore) les deux mamelles des politiques d'aménagement et d'urbanisme ?, in Pasquier R., Simoulin V., Weisbein (J.), dir., *La gouvernance territoriale. Pratiques, discours et théories*, Paris, LGDJ, p. 247-268.

Béal, V., Charvolin, F., et Morel Journal, C. (2011). La ville durable au risque des écoquartiers: Réflexions autour du projet New Islington à Manchester. *Espaces et sociétés* 147(4): 77.

Bemelmans-Videc, M.-L., Rist, C. et Vedung, E. O. (ed.). *Carrots, sticks, and sermons: Policy instruments and their evaluation*. Transaction Publishers, 2011.

Bertrand, F. (2009). La traduction régionale de la problématique du développement durable. Analyse comparative des régions Nord-Pas-de-Calais et Midi-Pyrénées, in Villalba B, dir., *Appropriations du développement durable. Emergences, diffusions, traductions*, Lille, Presses Universitaires du Septentrion, p. 187-211.

Bertrand, F. (2013). L'institutionnalisation locale des politiques climatiques en France, in Bertrand F., Rocher L., dir., *Les territoires face aux changements climatiques. Une première génération d'initiatives locales*, Bruxelles, PIE Peter Lang, p. 25-70.

Bertrand, F., Richard, E. (2013). Analyse de la construction des politiques régionales face aux changements climatiques, in Bertrand F., Rocher L., dir., *Les territoires face aux changements climatiques. Une première génération d'initiatives locales*, Bruxelles, PIE Peter Lang, p. 71-100.

Bertrand, F., Rocher, L., dir. (2013). *Les territoires face aux changements climatiques. Une première génération d'initiatives locales*, Bruxelles, PIE Peter Lang.

Bigard, C. (2018). Éviter-Réduire-Compenser: d'un idéal conceptuel aux défis de mise en œuvre: une analyse pluridisciplinaire et multi-échelle. Université Montpellier.

Cohen, M., de Smedt, G., Grandjean A., et Nicol, M. (2018). Adopter

une vision globale du financement de la transition énergétique. Policy paper « Chair energy & prosperity ». 32p.

Danjoie, C., Molina, G., Weisbein, J. (2013). Sensibilisation, prise en compte, et construction de l'opinion publique dans l'action publique territoriale de lutte contre le changement climatique, communication au colloque de l'AFSP.

Evrard, A., et Pasquier, R. (2018). Territorialiser la politique de l'éolien maritime en France. Entre injonctions étatiques et logiques d'appropriation, *Gouvernement et Action Publique*, 7(4), p. 63-91.

Foyer, J. (2016). Dans les coulisses de la COP21. *La Vie des idées* 23.

Hadjou-Belaid et al. 2018 – *Biological Conservation*. [En ligne](#).

Hasnaoui, N. A. (2018). La participation des agriculteurs à une politique alimentaire territoriale: le cas de Montpellier Méditerranée Métropole.

Hrabanski, M. (2020). Une climatisation des enjeux agricoles par la science? Les controverses relatives à la climate-smart agriculture. *Critique internationale*, no 1, p. 189-208.

I4CE, (2020). *Panorama des financements climat*.

Knill C., Tosun J., (2012), *Public Policy : a new introduction*, Londres, Palgrave Macmillan.

Lascoumes, P., Bonnaud, L., Le Bourhis, J.-P., et Martinais, E. (2014). *Le développement durable. Une nouvelle affaire d'État*. Paris, PUF.

Lascoumes, P., Le Galès P., dir. (2005). *Gouverner par les instruments*. Paris, Presses de Sciences Po.

Morvan, R., Rey-Valette, H., Delanoë, O., Baron-Yelles, N., Bernié-Boissard, C., Dewintre, C., & Allet, C. (2013). Quel littoral à l'horizon 2050? Un exercice de prospective participative en Languedoc-Roussillon. *Futuribles*, (396), p-48.

Pacheco-Vega, R. (2020). Environmental regulation, governance, and policy instruments, 20 years after the stick, carrot, and sermon typology. *Journal of Environmental Policy & Planning*, vol. 22, no 5, p. 620-635.

Parvu, L. (2020). L'aménagement urbain au défi du développement durable : dans les coulisses de la fabrique urbaine de Toulouse Métropole, doctorat de science politique, Université Toulouse Capitole.

Pasquier, R. (2012). *Le pouvoir régional*. Paris, Presses de Sciences Po.

Pasquier, R., Simoulin, V., Weisbein, J. dir. (2013). *La gouvernance territoriale. Pratiques, discours et théories*, Paris, LGDJ

Poupeau, F.-M. (2013) Quand l'État territorialise la politique énergétique. L'expérience des schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie. *Politiques et management public* 30(4): 443–472.

Rey-Valette, H., Sauboua, P., André, C., et Schauner, G. (2016). La gouvernance des territoires littoraux face aux enjeux de la relocalisation des biens et des activités en réponse à la montée du niveau de la mer. *Canadian Journal of Regional Sciences/Revue canadienne de sciences régionales* 39(1/3): 61–67.

Rey-Valette, H., Balouin, Y., Bazart, C., Bernier Boissard, C., Clément, V., Delanoë, O., Foucher, Y., Guérinnel, B., Hérivaux, C., et Morvan, C. (2014). Analyse des solidarités territoriales facilitant l'adaptation à la montée du niveau de la mer. Quelques enseignements issus du projet SOLTER en Languedoc-Roussillon.

Rey-Valette, H., Rulleau, B., Meur-Ferec, C., Flanquart, H., Hellequin, A. P., & Sourisseau, E. (2012). Les plages du littoral languedocien face au risque de submersion: définir des politiques de gestion tenant compte de la perception des usagers. *Géographie, économie, société*, 14(4), 369-392.

Rocle, N. (2017) L'adaptation des littoraux au changement climatique: une gouvernance performative par expérimentations et stratégies d'action publique.

Rumpala Y. (2003), Régulation publique et environnement. Questions écologiques, réponses économiques, Paris, L'Harmattan.

Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC), (2020).

12. Enjeux Psychosociologiques

Bernard, F. (2018). Communication engageante. Publibon. Dictionnaire encyclopédique et critique des publics. Mis [en ligne](#) le 04 septembre 2018.

Caisse Centrale de Réassurances CCR (2019). Les catastrophes naturelles en France. Bilan 1982-2019. 100p.

Caisse Centrale de Réassurances CCR (2020). La prévention des catastrophes naturelles par le FRRNM. Éléments d'éclairages pour la région Occitanie. Bilan 1995-2019. Ministère de la Transition Écologique et Solidaire. 56p.

Carbone 4 (2019), Faire sa part ? Pouvoir et responsabilité des individus, des entreprises et de l'état face à l'urgence climatique, 21p

Chabe-Ferret, S., Le Coent, P., Reynaud, A., Subervie, J., Lepercq, D., (2020). Peut-on " nudger " les agriculteurs pour économiser de l'eau ? INRAE Sciences Sociales, INRAE Département EcoSocio, 2020, 5/2020, pp.1-4. hal-03159618. [En ligne](#).

Chabe-Ferret, S., Le Coent, P., Reynaud, A., Subervie, J., Lepercq, D., (2019). Can We Nudge Farmers Into Saving Water? Evidence from a Randomised Experiment, European Review of Agricultural Economics, Volume 46, Issue 3, Pages 393-416. [En ligne](#).

Deci, E. L., & Ryan, R. M. (2002). Handbook of Self-Determination research. USA, The University of Rochester Press

Département du Gard (2020, nov.). « Eau et Climat 3.0 » Préparons l'avenir. Éviter l'ingérable et gérer l'inévitable.35p.

Dugast et Soyeux (2019) « Faire sa part ? Pouvoir et responsabilités des individus, des entreprises et de l'État face à l'urgence climatique », Étude Carbone 4, Paris

DRAAF Rhône-Alpes. (2014). Pour une promotion de la boîte à emporter en restauration traditionnelle ?

Festinger, L. (1957). A theory of cognitive dissonance. Stanford, CA: Stanford University Press

Girandola, F., & Fointiat, V. (2016). Attitudes et comportements: comprendre et changer. Grenoble: PUG

Girandola, F., Joule, R. (2012). La communication engageante : aspects théoriques, résultats et perspectives. L'Année psychologique, 112, 115-143. [En ligne](#).

GIEC, (2018). Réchauffement planétaire de 1,5°. Résumé à l'attention des décideurs. OMM-PNUE Rapport spécial 32p. [En ligne](#).

INSEE (2020, sept.). Plus de décès pendant d'épisode de Covid-19 du printemps 2020 qu'au cours de la canicule de 2003. INSEE Première n°1816. [En ligne](#).

Jouzel, J. et Abbadie, L. (2020). Rapport du groupe de travail « Enseigner la transition écologique dans le supérieur », Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, mai 2020

Juanals, B. (2019). « Les changements climatiques, une question incommunicable dans l'espace public ? Vers une communication écologique ». Hermès, La Revue n° 84, no 2, 134-39

Libaert, T. (2013). Communication(s) : 20 ans d'articles de référence. Dunod

Météo-France, en ligne

Ministère de l'Intérieur (2006, déc.). Guide ORSEC départemental, méthode générale. Tome G1. Direction de la défense et de la sécurité civile. 73p.

Morss, R. E., Demuth, J. L., & Lazo, J. K. (2008). Communicating Uncertainty in Weather Forecasts: A Survey of the US Public. Wea. Forecasting, 23, 974-991

Moser, (1992). Les stress urbains. Paris : Armand Colin, série « Psychologie »

Murphy, A. H., S. Lichtenstein, B. Fischhoff, and R. L. Winkler, (1980). Misinterpretations of Precipitation Probability Forecasts. Bull. Amer. Meteor. Soc., 61, 695-701

Nisbett, R., et Ross, L. (1980). Human inference: Strategies and shortcomings of social judgment, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.

Steiner, D. D., et Rolland, F. (2006). Comment réussir l'introduction de changements : les apports de la justice organisationnelle. In C. Lévy-Leboyer, C. Louche & J. P. Rolland (Eds.), RH : Les Apports de la Psychologie du Travail. 2. Management des Organisations (pp. 53-69). Paris : Editions d'organisation.

Thaler, R. H. (2018). From Cashews to Nudges: The Evolution of Behavioral Economics. American Economic Review 2018, 108(6): 1265-1287. [En ligne](#).

Verplanken, B., Aarts, H., van Knippenberg, A., and van Knippenberg, C. (1994). Attitude versus general habit: Antecedents of travel mode choice. Journal of Applied Social Psychology, 24(4), 285-300. [En ligne](#).

WRAP (2008). The food we waste, A study of the amount, types and nature of the food we throw away in UK households.



LISTE DES ACRONYMES

ADEME - Agence de la transition écologique	ISO - organisation internationale de normalisation
ANR - Agence Nationale de la Recherche	LCZ - Local Climate Zones
ARS - Agence Régionale de la Santé	Loi MAPTAM - Loi de modernisation de l'action publique territoriale et d'affirmation des métropoles
AUAT - Agence d'urbanisme de Toulouse	Loi NOTRe - Loi portant nouvelle organisation territoriale de la République
BRL - Bas Rhône Languedoc	ONERC - Observatoire national sur les effets du réchauffement
CACG - Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne	ONF - Office National des Forêts
CatNat - Catastrophes Naturelles	PC(A)ET - Plan climat-(air)-énergie territorial
CCR - Caisse Centrale de Réassurance	PLU (i) (H) - Plan Local d'Urbanisme (intercommunal) (et Habitat)
CNPF - Centre National de la Propriété Forestière	PPRn – PPRi - Plan de Prévention des Risques naturels - inondation
COP - Conférence des Parties	RCM - Regional Circulation Model
CORDEX - Coordinated REgional Climate Downscaling Experiment	RCP – SRES - Representative Concentration Pathways
DINAMIS - Dispositif Institutionnel National d'Approvisionnement Mutualisé en Imagerie Satellite	REPOS - région à énergie positive
DRAAF - Direction régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt	RGA - retrait gonflement des argiles
DREAL - Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement	SAFRAN - Système d'Analyse Fournissant des Renseignements Adaptés à la Nivologie
DRIAS - Donner accès aux scénarios climatiques Régionalisés français pour l'Impact et l'Adaptation de nos Sociétés et environnements	SCoT - Schéma de Cohérence Territoriale
GCM / RCM - Modèle de Circulation Général / Modèle de Circulation Régional	S(a)fN - solutions (d'adaptation) fondées sur la nature
GES - Gaz à Effet de Serre	SRADDET - Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires
GIEC - Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du Climat	SRADDT - Schéma régional d'aménagement et de développement durable du territoire
GIEE - Groupement d'intérêt économique et environnemental	SRCAE - Schéma régional climat air énergie
ICU - Ilot de chaleur urbain	SROCC - Special Report on the Ocean and the Cryosphere in a Changing Climate
IFM - Indice Forêt Météo	TECV - (Loi relative à la) Transition Energétique pour la Croissance Verte
INSEE - Institut national de la statistique et des études économiques	TEPCV - Territoire à Energie Positive pour la Croissance Verte
IPBES - Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques	UICN - Union Internationale pour la Conservation de la Nature

LISTE DES PERSONNES AYANT CONTRIBUÉ AU CROCC_2021

NOM Prénom (affiliation)

ABELLA Mathieu (Terres Inovia)	CHAMPOLIVIER Luc (Terres Inovia)	GUÉRIN-SCHNEIDER Lætitia (INRAE - G-EAU)
ACHIN Coralie (UGA)	CHAUVIN Sébastien (FORESPIR)	GUIRESSE Maritxu (INP ENSAT - ECOOMP)
ADELIN Karine (ONERA)	CHEVALLIER Pierre (IRD HSM)	HAGIMONT Steve (UVSQ - CHCSC)
AGUEJDAD Rahim (CNRS - TETIS)	COLON Marine (AgroParisTech G-EAU)	HANNIN Hervé (AGRO - MOISA)
AIT HADDOU Hassan (ENSAM - LIFAM)	CONSTANTIN Julie (INRAE AGIR)	HAOUES-JOUVE Sinda (UT2J - LISST)
ALBERT Solène (UPVD - CRESEM)	CORRALES David Camilo (INRAE AGIR)	HATT Emeline (AMU - LIEU)
ALESSANDRI Jean-Pierre (ARS Corse)	DAYOUB Elana (INP Ensats AGIR)	HEURTEFEUX Hugues (EID Méditerranée)
ALLETTO Lionel INRAE (AGIR)	DEBAEKE Philippe (INRAE AGIR)	HIDALGO Julia (CNRS - LISST)
AMIOT-CARLIN Marie-Josèphe (INRAE - MOISA)	DELENNE Carole (UM HSM)	HOSSARD Laure (INRAE - Innovation)
ANDRÉ-DOUCET Agathe (ARS Occitanie)	DELPI Raphaël (FORESPIR)	HRABANSKI Marie (CIRAD)
ASSOUMOU Edith MPT)	DEMARCHI Marie (MT)	HUGUES Virginie (consultante)
ATTEIA Ariane (CNRS - MARBEC)	DEREMETZ Valentin (INP Purpan)	HURÉ Maxime (UPVD - CDED)
ATTIE Jean-Luc (UPS - LA)	DEROLEZ Valérie (IFREMER - MARBEC)	IDT Joël (UGE)
AUBRET Fabien (CNRS - SETE)	DE WIT Rutger (CNRS - MARBEC)	IMBERT Éric (UM - ISEM)
BACOU Michel (CEREMA)	DOUBLET Sylvain (Solagro)	JALENQUES-VIGOUROUX Béatrice (INSA - LERASS)
BALDET Thierry (CIRAD - ASTRE)	DRÉNOU Christophe (CNPFP)	JARNE Philippe (CNRS - CEFÉ)
BALOUIN Yann (BRGM - BRGM Occitanie)	DUBUISSON Brigitte (Météo-France - DCSC)	JEANDEL Catherine (CNRS - LEGOS)
BARBE Éric (INRAE - TETIS)	DUCASTEL Antoine (CRAD Art-Dev)	JOSSE Béatrice (Météo-France/CNRS - CNRM)
BARBERO Renaud (INRAE - RECOVER)	DUPUY Jean-Luc (INRAE URFM)	JOUANNO Gaëlle (Météo France - LERASS)
BARONE Sylvain (INRAE - G-EAU)	DUVALLET Gérard (UMPV CEFÉ)	JOURNET Étienne-Pascal (INRAE - AGIR)
BEC Béatrice (UM - MARBEC)	ELBAZ POULICHET Françoise (CNRS - HSM)	KLEIBER Didier (INP - Purpan)
BÉGHIN-TANNEAU Robin (INP Purpan - PPGV)	ESTEVE-MOUSSION Isabelle (ARS Occitanie)	LABROUSSE Camille (UPVD - CEFREM)
BERTHELOT Karl (EHESS)	ERIKSSON Andreas (UPS - LERASS)	LAGARDE Franck (IFREMER - MARBEC)
BERTHIER Étienne (CNRS - LEGOS)	FABRE Julie (consultante)	LAMICHHANE Jay-Ram (INRAE - AGIR)
BONHOMME Marion (INSA - LMDC)	FABRE Sophie (ONERA - DOTA)	LE COINTE Pierre (BRGM - BRGM Occitanie)
BORRELL ESTUPINA Valérie (UM - G-EAU)	FABUREL Guillaume (UL - TRIANGLE)	LE COËNT Philippe (BRGM)
BOURRIN François (UPVD - CEFREM)	FARGEON Hélène (MAA - DGPE)	LEBLOIS Antoine (INRAE - CEE-M)
BRETAGNE Geneviève (AUAT - LISST)	FERREIRA Loriane (UL - TRIANGLE)	LEPERCQ Daniel (CACG)
BRIANE Gérard (UT2J - GEODE)	FLEURY Perrine (BRGM)	LE ROUX Gael (CNRS - ECOOMP)
BRIOTTET Xavier (ONERA)	FRANÇOIS Hugues (UGA - INRAE LESSEM)	LEVEQUE Fabian (UL - TRIANGLE)
BRUN Alexandre (UMPV - LAGAM)	FROMENTIN Jean-Marc (IFREMER - MARBEC)	LUCIANI Daniel (ICOM 21)
CABALLERO Yvan (BRGM - G-EAU)	GARIN Patrice (INRAE - G-EAU)	LUDWIG Wolfgang (UPVD - CEFREM)
CAILLAUD Cécile (Météo-France CNRM)	GARY Christian (INRAE - ABSys)	LURETTE Amandine (INRAE - SELMET)
CAKIR Roxelane (UPS - ECOOMP)	GASCOIN Simon (CNRS - CESBIO)	MADRID Aurélie (IDELE)
CANNOU-SPECHT Maryline (UP)	GAUTHIER Perrine (CNRS - CEFÉ)	MARTI Renaud IRD (CBGP)
CARAGLIO Yves (CIRAD - AMAP)	GEORGE Emmanuelle (UGA - INRAE LESSEM)	MARTIN-St-PAUL Nicolas (INRAE - URFM)
CARMAGNOLA Carlo (Météo-France)	GHIOTTI Stéphane (CNRS - Art-Dev)	MASSON Valery (Météo-France/CNRS - CNRM)
CARROUET Guillaume (UPVD - Art-Dev)	GIRANDOLA Fabien (AMU - LPS)	MATHIEU-ERNANDE Gaëlle (UM - Dispositif Biodiv'Oc)
CASTETS Mathieu (CIRAD - TETIS)	GIRAULT Mathilde (UL)	MAUREL Pierre (TETIS)
CATALA Nicolas (CYPRES)	GISCLARD Béatrice (UN - PROJEKT)	MAURY Pierre (INP ENSAT - AGIR)
CATOIR-BRISSON Marie-Julie (UN - PROJEKT)	GIULIANO Simon (INP Purpan - AGIR)	MÉNONI Emmanuel (OFB - DRAS)
CAUSSE Elsa (UN - CHROME)	GOBET Angélique (IFREMER - MARBEC)	MÉTAYER Nicolas (Solagro)
CHABE-FERRET Sylvain (UTC - TSE)	GOURDIER Sébastien (BRGM)	MEUNIER Jules-Mathieu (UGE - Laburba)
CHAMBERT Charlotte (Terres Inovia)	GRAVELINE Nina (INRAE - Innovation)	MICHEL Aurélie (ONERA - DOTA)
	GRISON Claude (CNRS - UM ChimEco)	
	GUÉRIN Frédéric (UPS - GET)	

MICHEL Laura (UM - CEPEL)	REYNAUD Arnaud (UTC - TSE)	SOUID-PONCELIN Clémence (Eclr)
MORIN Samuel (Météo-France/CNRS - CNRM)	RIBES Aurélien (Météo-France/CNRS - CNRM)	STARK Fabien (INRAE - PASTO)
MOSTAJIR Behzad (CNRS - MARBEC)	RICHARD Marion (IFREMER - MARBEC)	STROSSER Pierre (ACTeon)
MOULIN Charles-Henri (AGRO - SELMET)	RICHARD Sophie (AgroParisTech - G-EAU)	SUBERVIE Julie (INRAE - CEE-M)
MOULLEC Fabien (NIOZ - DCS)	RICHARD Isabelle (Environnons)	TARDIEU François (INRAE - LEPSE)
NABAT Pierre (Météo-France/CNRS - CNRM)	RIGAUD Sylvain (UN - CHROME)	TECHER Magalie (ENSAM - LIFAM)
NAULLEAU Audrey (INRAE - ABSys)	RIGOLOT Éric (INRAE - URFM)	TERRADEZ Juan (OPCC)
NICOLINI Éric CIRAD AMAP	ROBIN Marie-Hélène (INP Purpan - AGIR)	THÉNARD Vincent (INRAE - AGIR)
OLLAT Nathalie (INRAE - EGFV)	ROBIN Yoann (Météo-France/CNRS - CNRM)	THOMPSON John (CNRS - CEFE)
OPITZ Thomas (INRAE - BIOSP)	ROUCH Laura (UGA - INRAE LESSEM)	TOULEMONDE Gwladys (UM - INRIA)
PARENT Boris (INRAE - LEPSE)	RUFFAULT Julien (INRAE - URFM)	TOUZARD Jean-Marc (INRAE - Innovation)
PARROD Camille (ACTeon)	SABATIER Sylvie (CIRAD - AMAP)	TRAMBLAY Yves (IRD - HSM)
PIMONT François (INRAE - URFM)	SACHER Michel (CYPRES)	TRAN Annelise (CIRAD - TETIS)
PIOCH Sylvain (UMPV - LAGAM)	SADAOUI Mahrez (UPVD - CEFREM)	TRAVERS Marie-Agnès (IFREMER - IHPE)
PITA Ignacio (IRD - MARBEC)	SALAS Y MELIA David (Météo-France/CNRS - CNRM)	VAN MUNSTER Manuella (INRAE - PHIM)
PLANTON Serge (Météo-France - retraité)	SAMACOÏTS Raphaëlle (Météo-France - DCSC)	VERRHIEST-LEBLANC Ghislaine (MIIAM - DREAL ZDS Sud)
POUJOL Gabriel (OpenIG)	SAUQUET Éric (INRAE - Rivery)	VIDAL Jean-Philippe (INRAE - Rivery)
POUMARAT Laurent (ARS Zonale)	SCHATZ Bertrand (CNRS - CEFE)	VIDUSSI Francesca (CNRS - MARBEC)
POURTAÏN Éric (CYPRES)	SCHEINER Javier (INP Purpan - EFE)	VILE Denis (INRAE - LEPSE)
PRÉVOT Laurent (INRAE - LISAH)	SCHÉOU Bernard (UPVD - Art-Dev)	VINET Freddy (UMPV - LAGAM)
PUCHACZEWSKI Robin (UT2J - LISST)	SCHOVING Céline (INRAE - AGIR)	VLES Vincent (UT2J - CERTOP)
RAMDANI Alaa (ARS Zonale)	SEVAULT Florence (Météo-France/CNRS - CNRM)	VOLAIRE Florence (INRAE - CEFE)
RAYNAL Hélène (INRAE - AGIR)	SIGGINI Gildas (MPT - CMA)	WEBER Christiane (CNRS - TETIS)
REGIS Julie (UN CHROME)	SIMONET Guillaume (RECO - associé LISST)	WEISBEIN Julien (ScPo - LASSP)
RENOU Lucie (UGE)	SOMOT Samuel (Météo-France/CNRS - CNRM)	WELCKER Claude (INRAE - LEPSE)
REVELLI Bruno (UT2J - LISST)	SOUBEYROUX Jean-Michel (Météo-France - DCSC)	WILLAUME Magali (INP ENSAT - AGIR)
REY-VALETTE Hélène (UM - CEE-M)		ZAOUCHE GAUDRON Chantal (UT2J - LISST)



Crédit photo : Tim Mossholder, Pexels.com

LISTE DES ACRONYMES DES AFFILIATIONS DES CONTRIBUTIONS

Institutions d'Occitanie (ou opérant en)

AGRO - L'institut AGRO
ARS - Agence régionale de santé
AUAT - Agence d'Urbanisme et d'Aménagement Toulouse
BRGM - Bureau de recherches géologiques et minières
CACG - Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne
CBNPMP - Conservatoire Botanique National des Pyrénées et de Midi-Pyrénées
CIHEAM - Centre international de hautes études agronomiques méditerranéennes
CIRAD - Centre de coopération internationale en recherche agronomique pour le développement
CNES - Centre national d'études spatiales
CNRM - Centre National de Recherches Météorologiques
CNRS - Centre national de la recherche scientifique
ENSAM - École Nationale Supérieure d'Architecture de Montpellier
ENSAT - École Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse
FORESPIR - Regroupement des acteurs forestiers pyrénéens
IAMM - Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier
IDELE - Institut de l'élevage
IFREMÉR - Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer
INP - Institut national polytechnique (de Toulouse)
INRAE - Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement
INRIA - Institut national de recherche en informatique et en automatique
INSA - Institut national des sciences appliquées
IRD - Institut de recherche pour le développement
MAA - Ministère de l'Alimentation et de l'Agriculture (DGPE)
MT - Maison de la télédétection
Météo-France
OFB - Office Français de la Biodiversité
ONERA - Office national d'études et de recherches aérospatiales
OPenIG - Occitanie Pyrénées en Intelligence Géomatique
TSE - Toulouse School of Economics
UPVD - Université de Perpignan Via Domitia
UM - Université de Montpellier
UN - Université de Nîmes
UPS - Université de Toulouse Paul Sabatier
UT2J - Université de Toulouse Jean-Jaurès
UTC - Université Toulouse Capitole

UMPV - Université de Montpellier Paul Valéry

Laboratoires d'Occitanie

ABSys - Agrosystèmes Biodiversifiés
AGIR - AGroécologie, Innovations et Territoires
ART-DEV - Acteurs, Ressources et Territoires dans le Développement
ASM - Archéologie des Sociétés Méditerranéennes
ASTRE - Animal Santé Territoires Risques Ecosystèmes
C2MA - Centre des matériaux des mines d'Alès
CBGP - Centre de Biologie pour la Gestion des Populations
CDED - Centre du droit économique et du développement
CEE-M - Centre d'Économie de l'Environnement de Montpellier (CEE-M)
CEFE - Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive
CEFREM - Centre de formation et de recherche sur les environnements méditerranéens
CEPEL - Centre d'Études Politiques Et socialEs
CERTOP - Centre d'étude et de recherche Travail, Organisations, Pouvoirs
CERS - Collectif : Expériences Réseaux et Sociétés (LISST)
Cesbio - Centre d'Études Spatiales de la Biosphère
ChimEco - Laboratoire de Chimie bio-inspirée et d'Innovations écologiques
CHROME - Risques Chroniques Émergents
CRESEM - Centre de Recherches sur les Sociétés et Environnements en Méditerranées
DCSC - Direction de la Climatologie et des Services Climatiques
DOTA - Département optique et techniques associées,
ECOOMP - Laboratoire écologie fonctionnelle et environnement
ESPACE-DEV - Observation spatiale, modèles et science appliquée
G-EAU - Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages
GEODE - Géographie de l'environnement
GM - Géosciences Montpellier
HSM - HydroSciences Montpellier
IHPE - Interactions Hôtes-Pathogènes-Environnements
Innovation Innovation et développement dans l'agriculture et l'alimentation
ISEM - Institut des Sciences de l'Évolution de Montpellier
L2C - Laboratoire Charles Coulomb
LA - Laboratoire d'Aérodynamique
LAGAM - Laboratoire de Géographie et d'Aménagement de Montpellier
LASSP - Laboratoire de Sciences Sociales du Politique

LEGOS - Laboratoire d'études en géophysique et océanographie spatiales

LEPSE - Laboratoire d'écophysiologie des plantes sous stress environnementaux

LERASS - Laboratoire d'Études et de Recherches Appliquées en Sciences Sociales

LIFAM - Laboratoire Innovation Formes Architectures Milieux

LIRMM - Laboratoire d'Informatique, de Robotique et de Microélectronique de Montpellier

LISAH - Laboratoire d'Etude des Interactions entre Sol-Agrosystème-Hydrosystème

LISST - Laboratoire Interdisciplinaire Solidarités, Sociétés, Territoires

LMDC - Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions

MARBEC - MARine Biodiversity, Exploitation and Conservation (Université de Montpellier, CNRS, IFREMER, IRD)

MOISA - Montpellier Interdisciplinary center on Sustainable Agri-food

PASTO - UMT Ressources et transformations des élevages pastoraux en territoires méditerranéens

PPGV - Physiologie, Pathologie et Génétiques Végétales

PROJEKT - Laboratoire de recherche en design et innovation sociale

SELMET - Systèmes d'élevage méditerranéens et tropicaux

SETE - Station d'Écologie Théorique et Expérimentale

TETIS - Territoires, Environnement, Télédétection et Information Spatiale

Autres institutions et laboratoires

AMU - Aix-Marseille Université

BiosP - Biostatistique et processus spatiaux

CEREMA - Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement

CMA - Centre de Mathématiques Appliquées

CYPRES - Centre d'information pour la prévention des risques

majeurs

DCS - Department of Coastal Systems

DREAL ZDS Sud - Direction Régionale Environnement Aménagement Logement - de zone de défense et de sécurité sud

EID Méditerranée - Entente interdépartementale pour la démoustication

Environnons - Bureau d'études

EGFV - Écophysiologie et génomique fonctionnelle de la vigne

FORESPIR - Groupement européen d'intérêt économique
FORESPIR

INCIAM - Institut Créativité et Innovations

LIEU - Laboratoire Interdisciplinaire Environnement Urbanisme

LPS - Laboratoire de Psychologie Sociale

ICOM 21 - Agence de communication

MIIAM - Mission interrégionale « Inondation Arc Méditerranéen »

MPT - Mines Paris Tech

NIOZ - Royal Netherlands Institute for Sea Research

RECOVER - Risques, ECOsystèmes, Vulnérabilité, Environnement, Résilience

SETE (CNRS & UPS) - Station d'Ecologie Théorique et Expérimentale

SHOM - Service hydrographique et océanographique de la Marine

Terres Inovia - Institut technique de la filière des huiles et protéines végétales et de la filière chanvre

TRIANGLE - Action, discours, pensée politique et économique

UGA - Université Grenoble Alpes

UGE - Université Gustave Eiffel

UL - Université de Lyon

UP - Université de Paris

UPPA - Université de Pau et des Pays de l'Adour

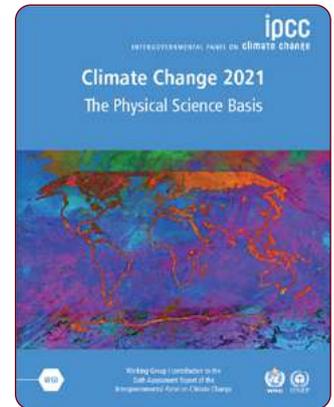
URFM - Unité de Recherche écologie des Forêts Méditerranéennes



Préparation d'échantillons de sol pour la conservation en congélateur. Plateforme GENOSOL dans l'UMR d'agroécologie. (Source : INRAE / B. Nicolas, 2019).

ANNEXE 1

RÉSUMÉ des messages clés du tome 1 du rapport du GIEC 2021



A. L'état actuel du climat

A1. L'influence humaine sur l'atmosphère, l'océan et la terre est sans équivoque. Des changements généralisés et rapides dans l'atmosphère, l'océan, la cryosphère et la biosphère se sont produits.

A2. L'ampleur des changements récents dans l'ensemble du système climatique et l'état actuel de nombreux aspects du système climatique sont sans précédent depuis des siècles voire des milliers d'années.

A3. Le changement climatique induit par l'humain affecte déjà de nombreux phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes dans toutes les régions du monde. Les preuves des changements observés dans les extrêmes tels que les vagues de chaleur, les fortes précipitations, les sécheresses et les cyclones tropicaux, et, en particulier, leur attribution à l'influence humaine, se sont renforcées depuis le rapport de 2014 (AR5).

A4. Une meilleure connaissance des processus climatiques, des preuves paléoclimatiques et de la réponse du système climatique à l'augmentation du forçage radiatif donne une meilleure estimation de la sensibilité climatique à l'équilibre de 3 °C avec une plage plus étroite par rapport à AR5.

B. Les possibles climats futurs

B1. La température de surface mondiale continuera d'augmenter jusqu'au milieu du siècle au moins dans tous les scénarios d'émissions considérés. Le réchauffement climatique de 1,5 °C et 2 °C sera dépassé au cours du XXI^e siècle à moins que des réductions importantes d'émissions de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre ne se produisent dans les décennies à venir.

B2. De nombreux changements dans le système climatique deviennent plus importants en relation directe avec l'augmentation du réchauffement climatique. Ils comprennent l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des extrêmes de chaleur, des vagues de chaleur marines et des fortes précipitations, des sécheresses agricoles et écologiques dans certaines régions et de la proportion de cyclones tropicaux intenses, ainsi que des réductions de la banquise arctique, de la couverture neigeuse et du pergélisol.

B3. Le réchauffement climatique continu devrait intensifier davantage le cycle mondial de l'eau, y compris sa variabilité, les précipitations mondiales de la mousson et la gravité des événements humides et secs.

B4. Dans les scénarios d'augmentation des émissions de CO₂, les puits de carbone océaniques et terrestres devraient être moins efficaces pour ralentir l'accumulation de CO₂ dans l'atmosphère.

B5. De nombreux changements dus aux émissions de gaz à effet de serre passées et futures sont irréversibles pendant des siècles voire des millénaires, en particulier les changements dans l'océan, les calottes glaciaires et le niveau mondial de la mer.

C. Information climatique pour l'évaluation des risques et l'adaptation régionale

C1. Les facteurs naturels et la variabilité interne moduleront les changements causés par l'homme, en particulier à l'échelle régionale et à court terme, avec peu d'effet sur le réchauffement climatique centenaire. Ces modulations sont importantes à prendre en compte dans la planification de toute la gamme des changements possibles.

C2. Avec la poursuite du réchauffement climatique, chaque région devrait connaître de plus en plus de changements simultanés et multiples dans les facteurs d'impact climatique. Les changements de plusieurs facteurs d'impact climatiques seraient plus répandus à 2 °C par rapport à un réchauffement global de 1,5 °C et encore plus répandus et/ou prononcés pour des niveaux de réchauffement plus élevés.

C3. Des résultats à faible probabilité, tels que l'effondrement de la calotte glaciaire, des changements brusques de la circulation océanique, certains événements extrêmes composés et un réchauffement nettement plus important que la plage très probable évaluée de réchauffement futur ne peuvent être exclus et font partie de l'évaluation des risques.

D. Limiter le changement climatique futur

D1. Du point de vue des sciences physiques, limiter le réchauffement climatique d'origine humaine à un niveau spécifique nécessite de limiter les émissions cumulées de CO₂, en atteignant au moins des émissions nettes de CO₂, ainsi que de fortes réductions des autres émissions de gaz à effet de serre. Des réductions fortes, rapides et soutenues des émissions de CH₄ limiteraient également l'effet de réchauffement résultant de la baisse de la pollution par les aérosols et amélioreraient la qualité de l'air.

D2. Les scénarios avec des émissions de GES très faibles ou faibles (SSP1-1.9 et SSP1-2.6) conduisent en quelques années à des effets perceptibles sur les concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols, et la qualité de l'air, par rapport aux scénarios d'émissions de GES élevées et très élevées (SSP3-7.0 ou SSP5- 8.5). Dans ces scénarios contrastés, des différences perceptibles dans les tendances de la température de surface mondiale commenceraient à émerger de la variabilité naturelle dans un délai d'environ 20 ans, et sur des périodes plus longues pour de nombreux autres facteurs d'impact climatique (degré de confiance élevé).

ANNEXE 2

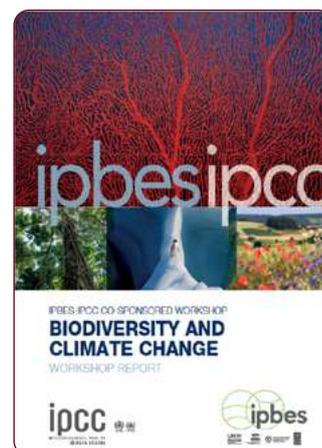
RÉSUMÉ des messages clés du rapport conjoint GIEC-IPBES 2021

Les auteurs avertissent que des actions étroitement ciblées pour lutter contre le changement climatique peuvent nuire directement et indirectement à la nature et vice-versa, mais de nombreuses mesures existent qui peuvent apporter des contributions positives significatives dans les deux domaines. Parmi les actions disponibles les plus importantes identifiées dans le rapport figurent :

- **Arrêter la perte et la dégradation des écosystèmes riches en carbone et en espèces sur terre et dans l'océan**, en particulier les forêts, les zones humides, les tourbières, les prairies et les savanes ; les écosystèmes côtiers tels que les mangroves, les marais salants, les forêts de varech et les herbiers marins ; ainsi que les habitats d'eau profonde et de carbone bleu polaire. Le rapport souligne que la réduction de la déforestation et de la dégradation des forêts peut contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine, dans une large fourchette allant de 0,4 à 5,8 gigatonnes d'équivalent dioxyde de carbone chaque année.
- **Restauration d'écosystèmes riches en carbone et en espèces**. Les auteurs soulignent que la restauration est l'une des mesures d'atténuation du climat basées sur la nature les moins chères et les plus rapides à mettre en œuvre - offrant un habitat indispensable pour les plantes et les animaux, améliorant ainsi la résilience de la biodiversité face au changement climatique, avec de nombreux autres avantages telles que la régulation des crues, la protection des côtes, l'amélioration de la qualité de l'eau, la réduction de l'érosion des sols et la garantie de la pollinisation. La restauration des écosystèmes peut également créer des emplois et des revenus, en particulier si l'on prend en considération les besoins et les droits d'accès des peuples autochtones et des communautés locales.
- **Accroître les pratiques agricoles et forestières durables pour améliorer la capacité d'adaptation au changement climatique, renforcer la biodiversité, augmenter le stockage du carbone et réduire les émissions**. Il s'agit notamment de mesures telles que la diversification des plantes cultivées et des espèces forestières, l'agroforesterie et l'agroécologie. Le rapport estime conjointement que l'amélioration de la gestion des terres cultivées et des systèmes de pâturage, comme la conservation des sols et la réduction de l'utilisation d'engrais, offre un potentiel annuel d'atténuation du changement climatique de 3 à 6 gigatonnes d'équivalent dioxyde de carbone.
- **Améliorer et mieux cibler les actions de conservation, coordonnées et soutenues par une adaptation et une innovation climatiques fortes**. Les aires protégées représentent actuellement environ 15 % des terres et 7,5 % de l'océan. Des résultats positifs sont attendus dans l'augmentation substantielle des zones intactes et efficacement protégées. Les estimations mondiales des besoins exacts en aires protégées et conservées efficacement pour assurer un climat habitable, une biodiversité autosuffisante et une bonne qualité de vie ne sont pas encore bien établies, mais varient de 30 à 50 % de toutes les surfaces océaniques et terrestres. Les options pour améliorer les impacts positifs des aires protégées comprennent des ressources plus importantes, une meilleure gestion et application, et une meilleure distribution avec une inter-connectivité accrue entre ces aires. Les mesures de conservation au-delà des aires protégées sont également mises en lumière - y compris les couloirs de migration et la planification des changements climatiques, ainsi qu'une meilleure intégration des personnes avec la nature pour assurer l'équité d'accès et d'utilisation des contributions de la nature aux personnes.
- **L'élimination des subventions qui soutiennent les activités locales et nationales nuisibles à la biodiversité** - telles que la déforestation, la surfertilisation et la surpêche, peut également soutenir l'atténuation et l'adaptation au changement climatique, ainsi que l'évolution des modes de consommation individuels, la réduction des pertes et du gaspillage, et l'évolution des régimes alimentaires, en particulier dans les pays riches, vers des options plus végétales.

Certaines mesures ciblées d'atténuation et d'adaptation au changement climatique identifiées par le rapport comme étant nocives pour la biodiversité et les contributions de la nature aux populations comprennent :

- **Planter des cultures bioénergétiques en monocultures sur une très grande partie des terres**. De telles cultures sont préjudiciables aux écosystèmes lorsqu'elles sont déployées à très grande échelle, réduisant les contributions de la nature aux personnes et entravant la réalisation de nombreux objectifs de développement durable. À petite échelle, parallèlement à des réductions prononcées et rapides des émissions de combustibles fossiles, les cultures bioénergétiques dédiées à la production d'électricité ou de carburants peuvent offrir des cobénéfices pour l'adaptation au climat et la biodiversité.
- **Plantation d'arbres dans des écosystèmes qui n'ont pas été historiquement des forêts et reboisement avec des monocultures - en particulier avec des espèces d'arbres exotiques**. Cela peut contribuer à l'atténuation du changement climatique, mais est souvent préjudiciable à la biodiversité, à la production alimentaire et aux autres contributions de la nature aux personnes, n'a aucun avantage clair pour l'adaptation au climat et peut déplacer les populations locales par la compétition pour la terre.
- **Augmentation de la capacité d'irrigation**. Une réponse commune pour adapter les systèmes agricoles à la sécheresse qui conduit souvent à des conflits liés à l'eau, à la construction de barrages et à la dégradation à long terme des sols due à la salinisation.
- **Toutes les mesures qui se concentrent trop étroitement sur l'atténuation du changement climatique devraient être évaluées en termes de leurs avantages et risques globaux, telles que certaines énergies renouvelables générant des poussées d'activité minière ou consommant de grandes quantités de terres. Il en va de même pour certaines mesures techniques trop étroitement axées sur l'adaptation, comme la construction de barrages et de digues**. Bien qu'il existe d'importantes options d'atténuation et d'adaptation au changement climatique, celles-ci peuvent avoir des impacts environnementaux et sociaux négatifs importants, tels que l'interférence avec les espèces migratrices et la fragmentation de l'habitat. Ces impacts peuvent être minimisés, par exemple, en développant des batteries alternatives et des produits à longue durée de vie, des systèmes de recyclage efficaces pour les ressources minérales et des approches de l'exploitation minière qui incluent de fortes considérations pour la durabilité environnementale et sociale.



L'ÉQUIPE D'ANIMATION DU RECO

L'équipe d'animation du RECO est composée de cinq scientifiques, trois chercheurs en poste et deux consultants-chercheurs indépendants. Tous les cinq ont une solide expérience en matière de recherche sur les changements climatiques. L'équipe fut composée en fonction de la motivation, de l'adéquation et de la diversité des disciplines ainsi que de l'équilibre régional et genré.

Titulaire d'un PhD en Sciences de l'environnement de l'Université du Québec à Montréal (Canada) et d'un Doctorat de Sociologie de l'Université de Paris Nanterre, **Guillaume Simonet** partage son expertise en tant que consultant, intervenant et chercheur indépendant en adaptation aux changements climatiques au sein d'Abstraction Services qu'il a fondé en 2016, après 10 ans dans la recherche. Ses travaux ont porté sur les contours théoriques de la notion d'adaptation, sur son intégration dans les politiques climatiques locales et sur les barrières et leviers favorisant sa mise en pratique au sein de plusieurs projets de recherche (ANR Adapt'Eau, ABSTRACT-colurba). Guillaume est l'initiateur du RECO et en est le coordonnateur actuel.



Sylvain Barone est chercheur en science politique à l'INRAE. Il conduit ses travaux au sein de l'UMR G-EAU (Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages) à Montpellier. Ce laboratoire regroupe de nombreux chercheurs de toutes disciplines travaillant sur la gestion de l'eau, et en particulier sur les trajectoires des socio-hydrosystèmes et leur régulation, la conception et l'évaluation d'outils facilitant la mise en œuvre de politiques publiques innovantes. Ses recherches portent sur la fabrication, la mise en œuvre et les recompositions de l'action publique en matière d'environnement et de changement climatique, qu'il analyse à travers les politiques qui se déploient à différentes échelles autour de certains risques, milieux ou ressources (gestion de l'eau, adaptation aux risques littoraux) et par le prisme du traitement judiciaire des atteintes à la nature.



Julie Fabre, docteure en sciences de l'eau et du climat et ingénieure agronome, exerce depuis 10 ans dans le domaine de l'adaptation au changement climatique. Travaillant aussi bien au sein de la recherche que des institutions et des organismes publics de gestion de l'eau, elle situe son champ d'action à l'interface entre la science et l'aide à la décision afin d'appuyer acteurs publics et privés dans l'anticipation des impacts du changement climatique. Julie a accompagné en tant que consultante des acteurs divers tout au long de leur démarche d'adaptation au changement climatique : évaluation des impacts, traduction en termes de besoins d'adaptation, développement de méthodes et d'outils, élaboration de stratégies et plans d'action.



Chercheuse en climatologie urbaine, **Julia Hidalgo** fait partie du Centre Interdisciplinaire d'Études Urbaines (CIEU) du laboratoire LISST (CNRS/UT2J) à Toulouse. Parmi les principales thématiques de recherche du CIEU, on peut citer l'habitat, les rapports entre économie et espaces urbains, la ville durable et le climat urbain. Le CIEU porte une attention particulière aux politiques qui agissent sur la ville, contribuent à modifier tant son fonctionnement social et citoyen que ses structures économiques. Ses recherches portent sur les modes d'articulation entre savoirs climatiques et savoirs urbanistiques en ayant recours aux observations, à la modélisation, et à l'analyse des outils de planification et d'aménagement urbains.



Chercheur climatologue, **David Salas y Melia** est le responsable du Groupe de météorologie de grande échelle et climat du CNRM (Météo-France / CNRS). Cette structure a pour principales missions de mieux comprendre les mécanismes et impacts du changement climatique, d'étudier la qualité de l'air, d'élaborer un système de prévision saisonnière du climat et de produire régulièrement des simulations du climat en soutien des rapports du GIEC. Ses recherches portent sur la compréhension et l'estimation des évolutions passées et futures du climat à travers l'utilisation de modèles. S'intéressant au rôle et à l'évolution des glaces marines au sein du système climatique, il a créé et développé un modèle représentant l'évolution de la banquise antarctique et arctique.



Aide extérieure (CROCC_2021)

Virginie Hugues est consultante en développement durable, spécialisée sur l'adaptation aux changements climatiques. En parallèle d'une expérience professionnelle en tant que chargée de projets Climat et RSE au Comité 21 (réseau multi-acteurs pour la mise en œuvre du développement durable dans les organisations publiques et privées), elle a réalisé un projet de recherche universitaire sur les freins et les leviers individuels et collectifs à l'adaptation aux changements climatiques. Aujourd'hui, elle travaille en tant que consultante avec des organisations publiques et privées afin de les accompagner dans l'élaboration et la mise en œuvre de leurs stratégies et projets de développement durable et d'adaptation aux changements climatiques.



Visé à rassembler et mettre en relation les chercheurs et les acteurs privés, publics et associatifs afin de favoriser l'échanges d'informations et d'aider les prises de décision à l'échelle locale et régionale

L'expertise englobe les experts scientifiques ainsi que les porteurs de connaissances et de savoirs locaux

Réseau d'expertise sur les changements climatiques en Occitanie

Le pluriel marque l'attachement aux effets multiples et interreliés du phénomène d'origine anthropique actuel

Marque l'échelle administrative tout en considérant les échelles territoriales



L'arrondi symbolise la planète et le caractère global de la problématique climatique à laquelle contribuera les acteurs de la région Occitanie



Croix occitane : symbole historique et culturel de la région



Représentation de l'ampleur, la violence et la rapidité des changements climatiques. Spirale, symbole de l'infini et de la vie (végétale et animale)



Symbolise les Pyrénées et l'ampleur des défis climatiques.



La sinusoïde représente la côte méditerranéenne et les changements des variables météorologiques (amplitude, durée, fréquence)



La couleur symbolise la cohésion régionale à travers l'importance et les défis de la filière viticole régionale, secteur présent en tous points de la région.

Conception graphique et logo : Abstraction Services, 2018



Le RECO est un Groupe régional d'experts sur le climat (GREC) porté par la MSH-SUD et la MSH-T. Ses missions sont de rapprocher les connaissances, les initiatives et les réseaux portant sur les changements climatiques à l'échelle de la région Occitanie dans le but d'éclairer les décisions en matière de mise en place de stratégies d'adaptation et d'actions locales.



Cahier Régional Occitanie sur les Changements Climatiques - Édition 2021

Coordination générale : Guillaume SIMONET

Appui à la coordination : Julie FABRE, Virginie HUGUES

Infographisme et maquettage : ABSTRACTION Services

Mise en ligne sur le site web : Ideae Pays Basque

Photo couverture : Melkan Bassil | www.imagesoccitanie.com

Citation suggérée :

RECO (2021). *Cahier Régional Occitanie sur les Changements Climatiques, édition 2021*. 270 p.

contact@reco-occitanie.org - www.reco-occitanie.org