

le livre numérique

Changement climatique

impacts, atténuation et adaptation

Sommaire

Avant-propos

Le "GIEC" : présentation et lien avec les "COP" 4

Introduction

L'Accord de Paris sur le climat - de la COP21 à la transformation du monde 8

Partie 1. Le système climatique : fonctionnement, trajectoire actuelle et future 11

Le système climatique : échelles d'espace et échelles de temps 12
Les gaz à effet de serre : sources d'émission et impacts sur le climat 16
L'observation du climat 21
L'attribution du changement climatique 25
La modélisation du climat 33
Les scénarios climatiques 37

Partie 2. Effets du changement climatique sur les milieux terrestre et marin 43

Effets du changement climatique sur le cycle de l'eau 44
Changement climatique et biodiversité 49
Changement climatique et activité de feux en France métropolitaine 52
Sensibilité des calottes polaires au changement climatique 57
L'océan et le climat 61
Biodiversité marine et changement climatique 65

Partie 3. Vulnérabilité des sociétés humaines au changement climatique 70

Changement climatique et santé humaine 71
Changement climatique, agriculture et sécurité alimentaire 74
Atténuer le changement climatique : quels défis économiques ? 78
L'Europe face au défi du changement climatique 81
Changements climatiques en Méditerranée 86
Le changement climatique : une réalité en Normandie 90

Partie 4. Accélérer l'atténuation et l'adaptation des territoires 94

L'adaptation au changement climatique : une introduction 95
L'atténuation du changement climatique 98
L'atténuation par la demande du changement climatique 101
Territoires urbains et changement climatique 104
Les territoires agricoles en polyculture élevage et le changement climatique 107
La montagne touristique face au changement climatique 111
Zones littorales et changement climatique 114
Les Solutions d'adaptation au changement climatique fondées sur la Nature dans les Outre-mer français 118
L'Accord de Paris sur le climat et les Objectifs de Développement Durable 123

Avant-propos

L'origine humaine du changement climatique actuel est incontestable et ses effets aux quatre coins du monde sont aujourd'hui déjà bien visibles. Il y a dans ce contexte d'urgence climatique plusieurs impératifs : comprendre la dynamique actuelle, ses évolutions possibles, ainsi que toutes ses conséquences et ses risques sur les humains, les sociétés et les écosystèmes ; rechercher et trouver collectivement des solutions pour atténuer ce changement climatique et, en parallèle s'y adapter, les deux étant indissociables.

L'objectif de ce livre numérique est de vous apporter des connaissances scientifiques actualisées sur l'ensemble de ces aspects. Nous avons mobilisé pour cela 26 enseignants-chercheurs et spécialistes issus de disciplines et d'établissements différents. Chacun aborde des sujets sur lesquels il est expert. La grande majorité de ces intervenants sont auteurs des rapports du GIEC ou bien contributeurs, à l'échelle de leur territoire.

Ce livre a été créé à partir des transcriptions des vidéos du MOOC « Changement climatique – Impacts, atténuations et adaptation », produit et coordonné par UVED en 2023.

Objectifs d'apprentissage de la formation

A la fin de cette formation, vous aurez compris et vous pourrez expliquer à d'autres :

- ▶ que le changement climatique est avéré
- ▶ que son origine anthropique est incontestable
- ▶ que ses impacts sur toutes les composantes du système Terre et sur tous les territoires sont déjà visibles
- ▶ que les risques qu'il fait peser sur les humains et les sociétés sont considérables
- ▶ que les solutions pour l'atténuer ou bien s'y adapter existent mais qu'elles requièrent l'implication de tous
- ▶ qu'il y a urgence et qu'il est important de se mobiliser et d'agir



Ressources vidéo

Parcours sur le portail UVED
<https://me-qr.com/l/climat2>

Introduction

Le "GIEC" : présentation et lien avec les "COP"

Éric BRUN

Ancien Secrétaire général de l'ONERC
Point focal France du GIEC



Dans l'évocation du changement climatique, deux organisations internationales jouent un rôle essentiel : le GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, traduction du terme anglais IPCC, et la CCNUCC, Convention-cadre des Nations unies sur le changement climatique, connue par ses COP, "Convention of Parties", qui se réunissent une fois par an et dont la COP21 a donné naissance à l'accord de Paris.

Ces deux organisations entretiennent des liens très étroits que j'évoquerai un peu plus tard, après avoir présenté en détail ce qu'est le GIEC, quelles sont ses missions et comment sont élaborés ses rapports.

1. Origine et objectifs du GIEC

La création du GIEC en 1988 fut la réponse donnée à la demande d'un nombre croissant d'États qui sentaient que le changement climatique allait devenir un sujet de préoccupation international aux enjeux considérables. Il fallait donc, pour ces États, disposer de connaissances scientifiques solides et non contestables.

Le GIEC a été créé par deux organisations des Nations unies, l'Organisation météorologique mondiale, l'OMM, qui était déjà très active dans le suivi et l'étude du climat, et le Programme des Nations unies pour l'environnement, le PNUE, qui était déjà pleinement engagé dans les questions environnementales, et en particulier les questions de pollution.

Pour remplir son mandat, le GIEC évalue, puis synthétise dans ses rapports les informations scientifiques les plus récentes en s'appuyant sur les publications dans des revues scientifiques des recherches, des études, déjà effectuées par des scientifiques, des experts ou bien des organismes. Le GIEC ne mène donc pas ses propres recherches, ce n'est ni un laboratoire ni une structure commanditant ou finançant des recherches. C'est un lieu d'expertise collective tout à fait original, visant à synthétiser les travaux menés dans les laboratoires du monde entier.

En appliquant des règles strictes et sous le contrôle de ses États membres, le GIEC présente dans ses rapports les éléments qui relèvent d'un consensus de la communauté scientifique tout en identifiant les limites dans les connaissances.

2. Gouvernance du GIEC

Le GIEC est ouvert à tous les pays membres de ses deux organisations fondatrices, l'OMM et l'ONU, et dans les faits, ce sont aujourd'hui 195 pays, donc la quasi-totalité des pays du monde, qui ont rejoint le GIEC. Ils constituent formellement ce qu'on désigne comme les membres du GIEC qui ne sont donc pas des personnalités scientifiques, mais des

États. Dans la suite, je dirai indifféremment pays, État ou gouvernement pour désigner les membres du GIEC. Ce sont ces États qui assurent collectivement la gouvernance de cette organisation et approuvent ses rapports. Cela se fait durant des sessions plénières qui réunissent les pays membres une ou plusieurs fois par an.

La gouvernance du GIEC porte sur le fonctionnement de son secrétariat, son financement, ses dépenses, sa communication, l'établissement et le suivi du programme de travail, qui est organisé en cycles d'une durée désormais de 5 à 7 ans. Cela concerne aussi le respect des procédures pour la tâche primordiale du GIEC, à savoir l'élaboration et la publication des rapports, incluant le respect des règles d'inclusivité et de comportement. Toutes les décisions au sein du GIEC sont prises par les représentants des gouvernements par consensus, c'est-à-dire à l'unanimité.

Le bureau du GIEC est l'organe scientifique qui mène le programme fixé par les États et qui a la responsabilité ultime de l'élaboration des rapports. Le bureau comprend notamment le président du GIEC, qui préside les sessions plénières. Il est composé actuellement de 34 membres élus par les États au tout début de chaque nouveau cycle du GIEC. C'est le seul moment, d'ailleurs, où les États procèdent à un vote. Des règles, établies avant chaque nouveau cycle, définissent la composition du bureau, c'est-à-dire les différentes fonctions, mais aussi la répartition géographique à respecter pour assurer une représentation équilibrée des disciplines couvertes et des origines géographiques.

En ce début de septième cycle du GIEC, qui devrait s'étendre jusqu'à une date comprise entre 2028 et 2030, le bureau est composé d'un

président, de trois vice-présidents, de six co-présidents de groupe de travail, de deux co-présidents de l'équipe spéciale sur les inventaires.

Les trois groupes de travail jouent un rôle particulièrement important car ils doivent élaborer un rapport d'évaluation très complet sur le thème de leur groupe, ainsi qu'une partie des rapports spéciaux. Une synthèse des trois rapports d'évaluation et des rapports spéciaux est produite en fin de chaque cycle. Elle constitue la production phare de ce cycle.

- Le groupe de travail I évalue les aspects physiques et physicochimiques du système climatique et de l'évolution du climat, notamment l'évolution récente du climat et son attribution aux activités humaines, les projections climatiques globales et régionales selon différents scénarios d'émission de gaz à effet de serre.
- Le groupe de travail II traite de la vulnérabilité au changement climatique des systèmes socioéconomiques et naturels, des impacts multi-échelle et multi-sectoriels de ce changement avec les risques associés et les possibilités de s'y adapter.
- Le groupe de travail III évalue les solutions envisageables dans tous les secteurs pour réduire les émissions de gaz à effet de serre dans leurs dimensions technologiques, socioéconomiques, financières et internationales.

L'équipe spéciale pour les inventaires nationaux de gaz à effet de serre développe et met à jour un guide méthodologique pour évaluer ces émissions. C'est l'outil universel pour que chaque pays comptabilise et rapporte ses émissions anthropiques des différents gaz à effet de serre.

Le GIEC suit des procédures et un calendrier précis pour produire ses rapports scientifiques en garantissant leur objectivité et la traçabilité de l'origine des connaissances présentées.

3. Exemple du groupe de travail 1 – 6^e cycle

Pour l'illustrer, prenons l'exemple du rapport du groupe de travail I produit dans le cadre du sixième cycle et publié en août 2021. Décidée en 2016 par les États, sa réalisation a été confiée aux deux scientifiques alors co-présidents du groupe de travail I, la Française Valérie Masson-Delmotte et le Chinois Panmao Zhai, et aux sept vice-présidents de ce groupe de travail, eux aussi scientifiques originaires des différentes régions du globe. Le groupe de travail I s'est appuyé sur une unité de support technique employant une dizaine de personnes.

La préparation d'un rapport d'évaluation procède de plusieurs étapes successives. La première étape, essentielle pour la suite, a consisté à définir le sommaire détaillé du futur rapport. Une première proposition a été élaborée lors d'une réunion d'une soixantaine d'experts. Cette réunion est dite de "*scoping*" en anglais. Ces experts ont identifié les nouvelles connaissances scientifiques depuis le dernier rapport et proposé une structure sous forme d'un sommaire détaillé pour les présenter de la façon la plus logique possible dans le futur rapport. Cette proposition de structure et ses fondements ont été examinés quelques mois plus tard par les États réunis en session plénière. Ils l'ont approuvée avec quelques modifications, ce qui a permis au GIEC de lancer un appel à auteurs pour rédiger chacun des douze chapitres qui avaient été proposés. Parmi les centaines d'auteurs dont la

candidature a été soumise par les États pour la plupart, le groupe de travail I en a sélectionné près de 200.

Les revues des versions successives d'un rapport sont une partie essentielle du processus d'élaboration. Cela permet de transmettre des commentaires aux auteurs pour assurer, d'une part, la qualité scientifique de l'évaluation, d'autre part, la transparence et la prise en compte exhaustive des publications sur les sujets traités. Les auteurs doivent considérer tous les commentaires reçus des experts ou des États lors de ces revues et dire quelle suite leur a été donnée. Il y a plusieurs dizaines de milliers de commentaires pour chacun des rapports. Pour effectuer ces revues, la France mobilise les administrations et les organismes de recherche concernés.

4. GIEC et COP

Les gouvernements, réunis en assemblée plénière, interviennent également à la toute dernière étape, qui est l'approbation du résumé à l'attention des décideurs. Son texte final est examiné, puis adopté phrase par phrase par consensus. Toutes les délégations doivent approuver chacune des phrases à l'unanimité sous réserve, bien entendu, de l'accord des auteurs du rapport. Cette phase d'approbation est très longue. Elle peut s'étendre sur plus d'une semaine et avec parfois plusieurs sessions durant des nuits entières. La plupart des gouvernements cherchent en effet à mettre en valeur dans le résumé pour décideurs les éléments du rapport qui les intéressent. Ils veillent également à ce que les connaissances scientifiques ne soient pas présentées de façon prescriptive vis-à-vis des politiques des gouvernements.

L'intervention des États est parfois considérée comme une censure de certains messages scientifiques. Ce n'est absolument pas le cas et de nombreux auteurs reconnaissent la valeur ajoutée de cette phase ultime de négociation. L'approbation par tous les États fait que les résumés pour décideurs des rapports du GIEC sont considérés comme une vérité universelle qui n'est plus remise en cause ensuite lors des négociations internationales sur le climat dans le cadre de la Convention-cadre des Nations unies, la CCNUCC, lors des fameuses COP climat annuelles. Ça, c'est un aspect qui était primordial des interactions qui existent entre le GIEC et la CCNUCC.

Les rapports du GIEC constituent la source principale de connaissances scientifiques pour l'ensemble des sujets de négociation climatique, notamment pour les bilans mondiaux de l'accord de Paris qui sont réalisés tous les 5 ans. Lorsqu'un nouveau rapport est publié par le GIEC, il est présenté officiellement par les scientifiques du GIEC aux États réunis lors des COP. Certains résultats clés du rapport sont repris dans le fondement des décisions prises lors de la COP, par exemple la nécessité d'atteindre un pic des émissions de gaz à effet de serre avant 2025 si on veut limiter le réchauffement mondial à 1,5°C.

Au sein de la Convention-cadre des Nations unies, la CCNUCC, de nombreux pays en développement s'appuient également sur les rapports du GIEC, en particulier pour étayer leurs demandes d'aide financière, que ce soit pour l'adaptation au climat futur ou bien pour bénéficier le plus rapidement possible des technologies les moins émettrices de gaz à effet de serre. Ainsi, chaque pays puise dans les rapports du GIEC les connaissances qui sont les plus utiles pour ses propres intérêts.

5. Perspectives

Le GIEC prépare actuellement son septième cycle dont le début a été marqué officiellement par l'élection en juillet 2023 d'un nouveau bureau. De nombreux défis devront être relevés, notamment comment produire de nouvelles connaissances avant le second bilan mondial de l'accord de Paris en 2028, ou bien comment faire évoluer les objectifs et les procédures du GIEC pour faire face à une croissance quasi exponentielle du nombre annuel de publications scientifiques sur le sujet du changement climatique.

L'Accord de Paris sur le climat - de la COP21 à la transformation du monde



Teresa RIBERA

Ancienne directrice de l'Institut de développement durable et des relations internationales (IDDRI)

Qu'est-ce qu'il faut retenir de l'accord de Paris sur le climat, adopté lors de la COP21 qui s'est déroulée en décembre 2015 ?

1. Un accord innovant, universel et solidaire

Il faut dire, en premier lieu, que c'est un accord innovant, universel et solidaire. On savait tous que la transformation de nos économies et de notre modèle de développement était inévitable pour assurer la prospérité les toutes les personnes du monde, dans un contexte où le climat est indispensable. C'est un problème global auquel la réponse sera collective, mais on ne sait pas comment faire. On n'a pas tous les éléments. On n'a pas de mode d'emploi qui nous explique comment faire. C'est pour ça qu'on a réussi à avoir un engagement de chaque pays. Chaque pays s'engage, dans la mesure de ses capacités, et grâce à la coopération internationale, basée sur un principe de solidarité avec les collectifs qui sont les plus vulnérables aux changements

climatiques. Les pays développés doivent aller plus vite dans la décarbonation et les pays en voie de développement doivent converger au fil du temps.

2. Un horizon de long terme

Le deuxième élément très intéressant de l'accord de Paris, c'est qu'il y a un horizon de long terme. Il y a une ambition sur où est-ce que nous voulons être d'ici quelques décennies. Un objectif, un agenda collectif pour assurer qu'on s'engage à contenir la hausse des températures bien en deçà de 2 degrés centigrades et s'efforcer de la limiter à 1,5. Ça veut dire qu'il faut développer des trajectoires pour atteindre la neutralité carbone dans la seconde moitié du siècle, et de le faire d'une manière collective, avec l'action de tous les pays et de tous les acteurs.

3. Un accord dynamique

Le troisième élément très intéressant, c'est que c'est un accord dynamique. Aujourd'hui, on a mis sur la table les contributions des pays sur comment faire des efforts pour décarboner leur économie. Mais il faut assurer que le bilan mondial, que nous faisons d'une manière régulière, nous permette d'aller au-delà de ce qu'on a dit aujourd'hui. Car on sait bien que ce que nous avons dit aujourd'hui ne suffit pas à arriver à cette neutralité de carbone que nous avons mis dans l'agenda collectif comme un engagement de l'humanité. On doit faire ce bilan tous les 5 ans et présenter des contributions plus ambitieuses. On ne peut pas revenir en arrière. On doit toujours aller au-delà de ce qu'on a déjà dit.

4. Dimension collective

L'élément qui montre ces capacités d'apprentissage collectif, ce partage des risques, s'est basé sur un acteur contraignant qui développe des éléments de transparence, qui pourra faire monter la confiance sur notre capacité collective à agir sur l'efficacité de nos actions. Il faut penser que c'est seulement si on arrive à développer cette capacité collective, qu'on arrivera à réussir cet objectif commun. L'élément le plus surprenant de l'accord de Paris, c'est son dynamisme. Il y a une dynamique internationale sans précédent. On a réussi à avoir 162 contributions nationales en très peu de temps. On a aussi réussi à avoir 143 ratifications du traité international à toute vitesse, juste après l'adoption en décembre 2015, en permettant que l'entrée en vigueur de l'accord ait lieu en moins d'un an après son adoption. C'est quelque chose qui pourrait nous faire penser que l'accord est fait, que l'action est déjà sur place, qu'il n'y a rien d'autre à faire. Pas du tout. L'accord de Paris nous propose une plateforme pour cette gouvernance mondiale de l'action sur le climat, mais il a besoin d'être développé.

5. Prochaines étapes

On a une période clé en face de nous pour nous assurer que tous les éléments de l'opérationnalisation de l'accord de Paris soient mis en place. La première chose qu'on doit faire est de développer l'ensemble des règles qui doivent être finalisées autour de 2018 pour assurer ces systèmes dynamiques, pour assurer ces systèmes de rattrapages dans les années qui viennent. On doit aussi être sûrs de la capacité des systèmes financiers globaux pour développer, pour montrer notre

solidarité, pour assurer les financements d'un modèle de développement différent dans les pays les plus vulnérables qui se sont engagés vers un modèle de développement beaucoup plus cohérent avec les besoins du climat. En 2018, on va commencer à faire ce premier bilan mondial sur ce qui fonctionne, sur ce qui ne fonctionne pas, comment renforcer ce qui fonctionne, comment corriger ce qui ne fonctionne pas. On lance un élan politique pour assurer la continuation de l'action collective autour du climat, qui va nous permettre de répondre à la promesse faite à Paris. Pour l'instant, on a annoncé pas mal d'actions, mais ce n'est pas encore une loi, mais c'est en projet. Assurer cette capacité de rattrapage et d'accélération de l'action est absolument clé.

6. Un agenda pour tous les secteurs

C'est vrai que le monde a changé. Il a changé dans une période très courte. Aujourd'hui, ce n'est plus une question Nord-Sud, c'est une question de réponse collective, avec des moyens différents. Aujourd'hui, ce n'est plus quelque chose qui doit compter sur l'action des états et tout le reste des acteurs privés n'en ont rien à faire. C'est tout le contraire. On sait bien que les stratégies de développement économique sont quelque chose qui doivent être cohérent avec les stratégies, les actions sur le climat, avec les limites physiques et chimiques de nos écosystèmes et de notre système climatique. Autrement, il n'y aura pas de développement. Il n'y aura pas prospérité. Il n'y aura pas non plus la capacité de vivre ensemble dans un contexte interdépendant et multipolaire comme celui qui représente le monde. C'est aussi quelque chose qui fait partie des décisions des investisseurs du monde financier. C'est aussi quelque chose qui est

déjà présent dans la compréhension de quels sont les profits, les coûts, les attentes de retour de n'importe quel investissement.

C'est pour ça que le monde financier est décidé à être beaucoup plus au courant, à comprendre beaucoup mieux quels sont les risques climatiques des décisions, et à quel point une intensité carbone et la prise en considération des impacts d'un climat différent sur les infrastructures physiques, qu'ils doivent donner en retour, sont importantes dans leurs prises de décisions, dans leur système de mesure des risques. C'est quelque chose qui est présent partout. C'est quelque chose qui nous amène dans un monde de responsabilité partagée, où chacun, à son niveau, doit prendre des actions, doit être en accord avec ses décisions. Ce n'est plus une question de gouvernement national, c'est aussi la question des villes, c'est la question des entreprises, c'est la question des associations, des individus, des valeurs de chacun parmi nous comme citoyen, comme consommateur. C'est aussi une question qui touche tous les secteurs de la décision publique et privée.

7. Conclusion

Quand on parle d'action sur le climat, ce n'est pas une question d'innovation, ce n'est pas seulement une question de science des climats, c'est une question qui doit toucher les décisions autour de l'énergie, autour des transports, autour des modèles urbains, autour des infrastructures, de l'agriculture, des forêts, de l'utilisation des sols, des systèmes fiscaux. C'est quelque chose qui doit être factorisé, qui doit être introduit dans n'importe quelle décision collective et privée du monde du 21^e siècle.

Objectifs d'apprentissage

- ▶ Connaître les différentes composantes du système climatique
- ▶ Identifier les différents gaz à effet de serre et leurs sources d'émission
- ▶ Appréhender l'attribution du changement climatique actuel et des événements extrêmes
- ▶ Appréhender les modèles climatiques : diversité, paramètres, échelles spatiales
- ▶ Appréhender les scénarios climatiques définis dans le 6^e rapport du GIEC



Ressources vidéo

Vidéos sur le portail UVED
<https://me-qr.com/l/climat2-s1>

Partie 1. Le système climatique : fonctionnement, trajectoire actuelle et future

Le système climatique : échelles d'espace et échelles de temps



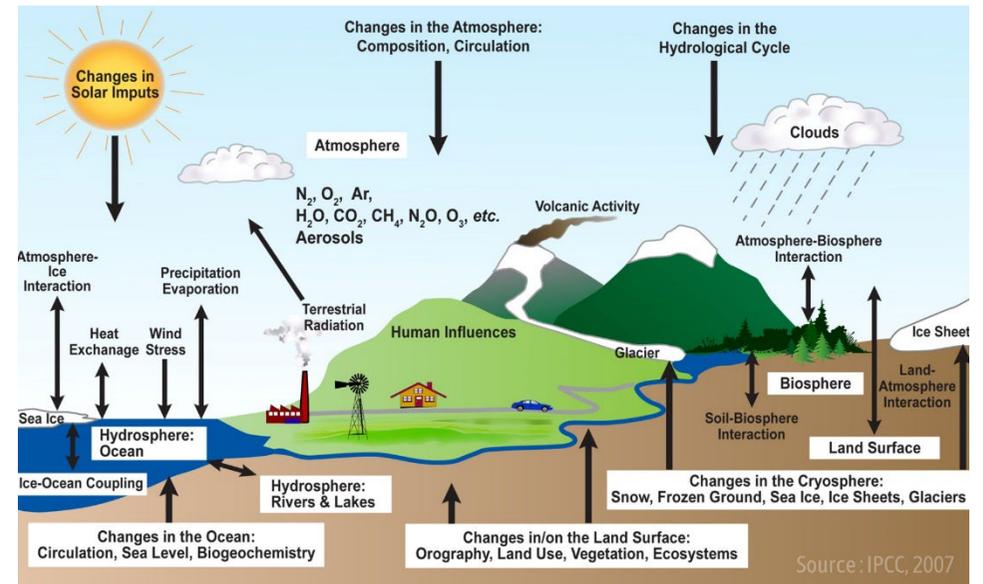
Hervé LE TREUT

Ancien directeur de l'Institut Pierre Simon Laplace

Quand on parle de changement climatique, on va nécessairement parler d'échelles de temps du système climatique. Ces échelles de temps du système climatique sont très diverses parce que le système climatique est lui-même fait de composantes qui sont très diverses.

1. Composantes du système climatique

L'élément central dans le système climatique est l'atmosphère. C'est celui de ces systèmes qui change le plus rapidement. La vitesse moyenne de l'écoulement atmosphérique c'est 10 m/s, c'est suffisant pour mélanger l'atmosphère à l'échelle de quelques semaines, de quelques mois, si on regarde les deux hémisphères. L'atmosphère, de ce point de vue-là distribue les climats à l'échelle de la planète, c'est donc le premier facteur qui module climat.



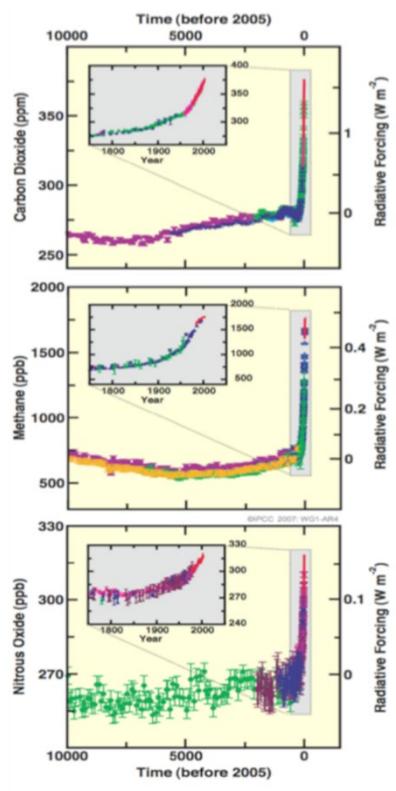
Mais l'atmosphère a peu de mémoire. La mémoire essentielle est dans l'océan. L'océan se déplace à des vitesses qui sont beaucoup plus faibles, souvent sous l'influence de l'atmosphère, peut-être de manière cent fois plus lente que l'atmosphère. C'est un géant tranquille qui peut s'animer de temps en temps et qui va agir sur le climat plutôt comme un métronome, un gardien du temps comparé à l'atmosphère. On a d'autres composantes qui elles ont des échelles de temps bien supérieures : les glaciers qui sont là depuis des millions d'années très souvent, le sol, des rivières. On a toute une série de composantes qui peuvent avoir des vitesses extrêmement différentes. Tout ça s'anime au fil du temps. On sait qu'on a des échelles de temps, comme pour les grandes glaciations, qui se situent à l'échelle des centaines de milliers d'années, des dizaines de milliers d'années. Avant cela, on a une histoire de la planète qui couvre des centaines de millions

d'années avec la dérive des continents. On a une histoire extrêmement riche.

2. De l'holocène à aujourd'hui

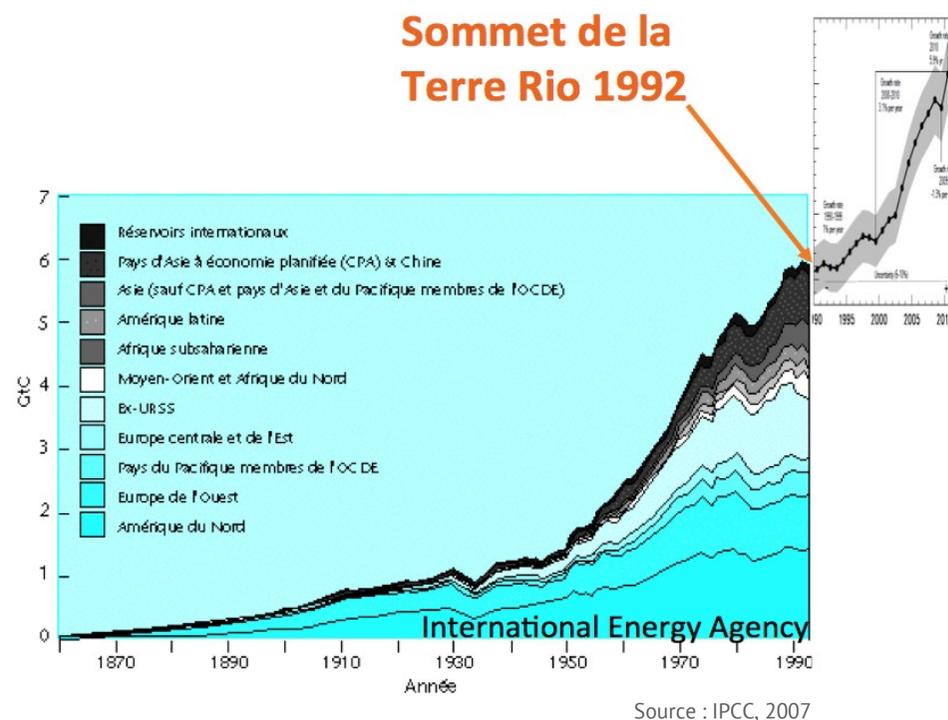
On met en évidence un contraste majeur entre une période où se sont développées nos civilisations, qui est très stable en fait en termes climatiques, et la période actuelle. On la décrit ici par trois paramètres qui sont trois gaz à effet de serre très importants : le CO₂, le méthane et le protoxyde d'azote (figure ci-contre).

On voit que sur 10 000 ans, le temps où se sont développées nos civilisations, c'est une période très chaude dans l'histoire de la planète. Ces gaz ont peu évolué. A la fin de cette période, on voit au contraire une croissance extrêmement rapide de ces gaz à effet de serre. Ces gaz ont une croissance qu'on associe souvent avec le début de l'ère industrielle. En fait, on est dans un système d'évolution qui est encore plus récent que cela. Ce que montrent les petits encadrés gris, c'est que cette augmentation des gaz à effet de serre est postérieure à la Deuxième guerre mondiale. Cela s'explique parfaitement par, par exemple, les inventaires de combustion du



Source : IPCC, 2007

charbon, du gaz naturel, du pétrole tels que peut les donner l'Agence Internationale pour l'Energie. On voit que le moment où tout cela augmente, le moment où tout cela s'emballe, c'est après la Deuxième guerre mondiale. On a un système qui s'est mis à évoluer très rapidement depuis cette époque-là.

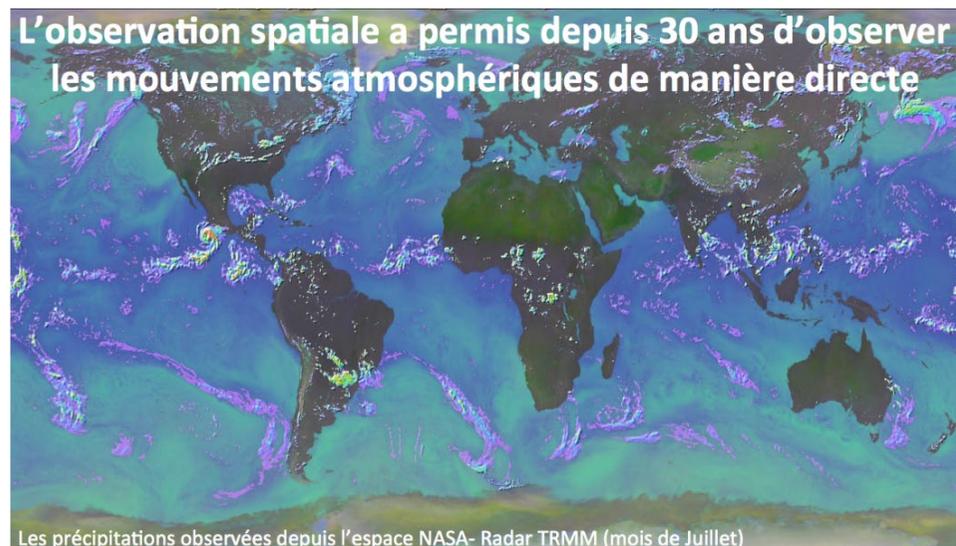


Si on s'en tient à ce seul niveau d'émission de CO₂ liée aux activités humaines, liée à la combustion des produits fossiles, on était en début de la période concernée, c'est-à-dire dans les années 50 à 1 ou 2 milliards de tonnes de carbone par an, on est passé à 6 ou 7 milliards de tonnes de carbone sur le premier de ces deux diagrammes que j'ai mis ensemble (figure ci-dessus), qui en fait nous amène à la conférence de Rio en 1992. Rio est la première conférence où on a essayé de mettre en place une

convention cadre des Nations Unies sur le changement climatique pour aussi pour essayer de réduire ces émissions. On voit qu'on n'y est pas arrivés et que depuis, on a continué à augmenter ces émissions qui sont maintenant à 10 milliards de tonnes de carbone par an. Donc, au sein d'un climat qui finalement a évolué à des échelles de temps très longues, on a créé un espace de variations extrêmement rapides comparé à un temps qui était relativement stable, qui est celui de notre civilisation et des 10 000 dernières années relativement chaudes dans lesquelles on a vécu.

3. Echelles d'organisation

Ce temps rapide des changements va s'articuler avec une géographie de ces changements. On a un système qui est particulier parce qu'il est très largement tributaire de ce qui se passe dans le domaine atmosphérique. Une des caractéristiques de l'atmosphère est d'avoir une circulation qui est partiellement organisée et partiellement imprédictible.



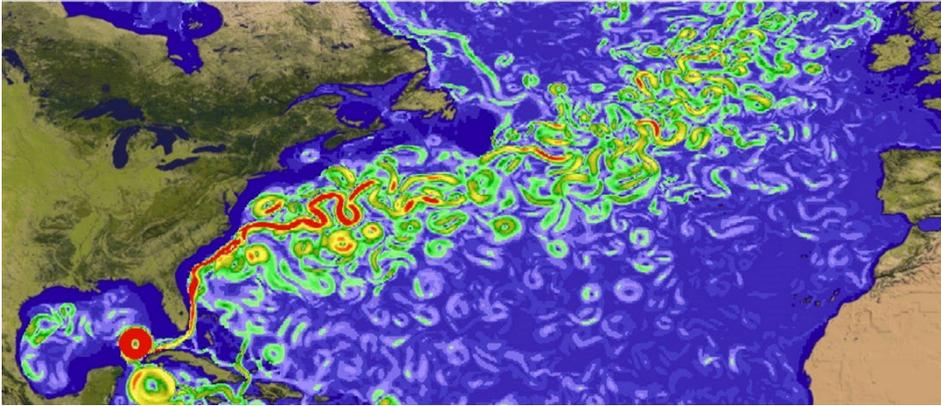
Cette organisation se voit sur la carte ci-dessus qui est une image radar instantanée de l'atmosphère, et qui est issue d'un programme de la NASA pour mesurer les précipitations depuis l'espace. Près de l'Équateur on a par exemple ce qu'on appelle le pot-au-noir, ici en blanc. Ce sont des grands cumulo-nimbus qui marquent la ceinture équatoriale.

A nos latitudes, on voit surtout des grands tourbillons qui sont des tourbillons autour des dépressions ou des anticyclones, et ils sont tous organisés à l'échelle des milliers de kilomètres donc on voit que l'atmosphère ne fonctionne pas de manière complètement chaotique. On pourra prévoir un certain nombre de choses mais on sait aussi que les prévisions météo sont limitées dans le temps à quelques jours. La capacité à faire des prévisions détaillées sera donc malgré tout limitée quand on s'intéressera aux dimensions régionales du changement.

On a un peu la même situation dans l'océan. L'océan est organisé à très grande échelle, alors beaucoup par la forme des bassins océaniques.

Vous avez sur la figure ci-dessous par exemple le Gulf Stream. Le Gulf Stream s'appuie sur le bord ouest de l'océan Atlantique, c'est-à-dire sur la côte est des États-Unis. Il amène depuis le Golfe du Mexique jusqu'à l'Arctique à la fois des eaux chaudes et des eaux salées qui vont plonger, qui vont mettre en route des circulations océaniques très précieuses.

Les tourbillons : un élément essentiel des écoulements océaniques (et atmosphériques)



Source : NASA

On sait que si le climat change, si on a plus d'eau douce dans les hautes latitudes de l'océan Atlantique, ce Gulf Stream risque de reculer vers le sud. On sait dire un certain nombre de choses sur les évolutions possibles de la circulation océanique. En même temps, on voit que cette circulation océanique, s'accompagne d'une série de tourbillons absolument considérables. Ces petits tourbillons sont des tourbillons qui sont un peu l'équivalent océanique de nos dépressions et de nos anticyclones. On ne les connaissait pas il y a quelques décennies, c'est là aussi l'observation spatiale qui nous les montre (là ce sont des simulations numériques qui permettent de les visualiser de manière peut-être plus illustrée et plus imagée).

4. Conclusion

Le grand enjeu auquel on a à faire face en tant que société, c'est justement d'arriver à déchiffrer ce que sera le futur dans un monde

qu'on est en train de secouer de manière très rapide par rapport à tous ces évolutions naturelles et dans lequel beaucoup d'éléments sont prévisibles mais beaucoup d'éléments ne seront pas prévisibles ? Cela veut dire qu'on sera obligés de les traiter comme des risques climatiques et ces risques climatiques sont maintenant une composante importante du paysage politique et avec lequel on doit affronter le futur.

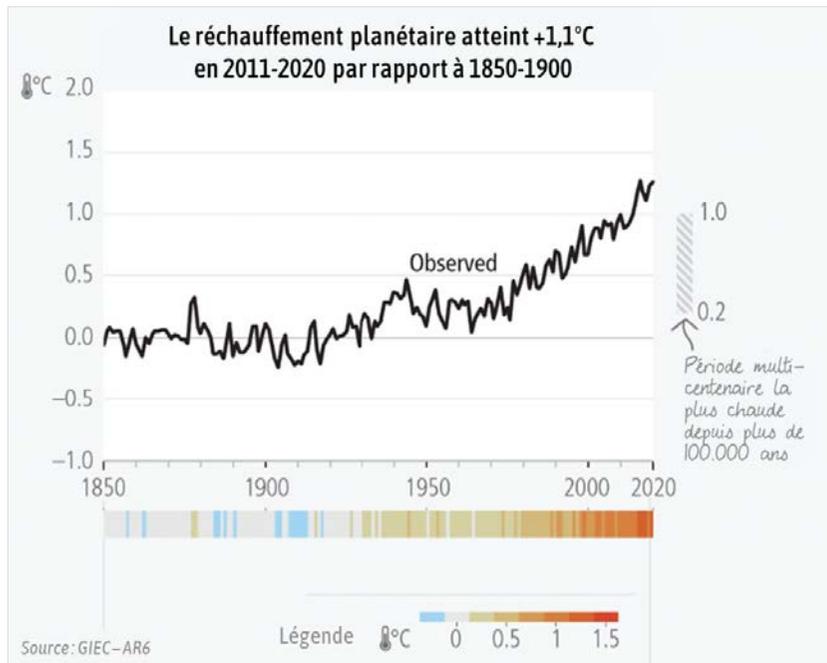
Les gaz à effet de serre : sources d'émission et impacts sur le climat

Sophie SZOPA
Directrice de recherche au CEA



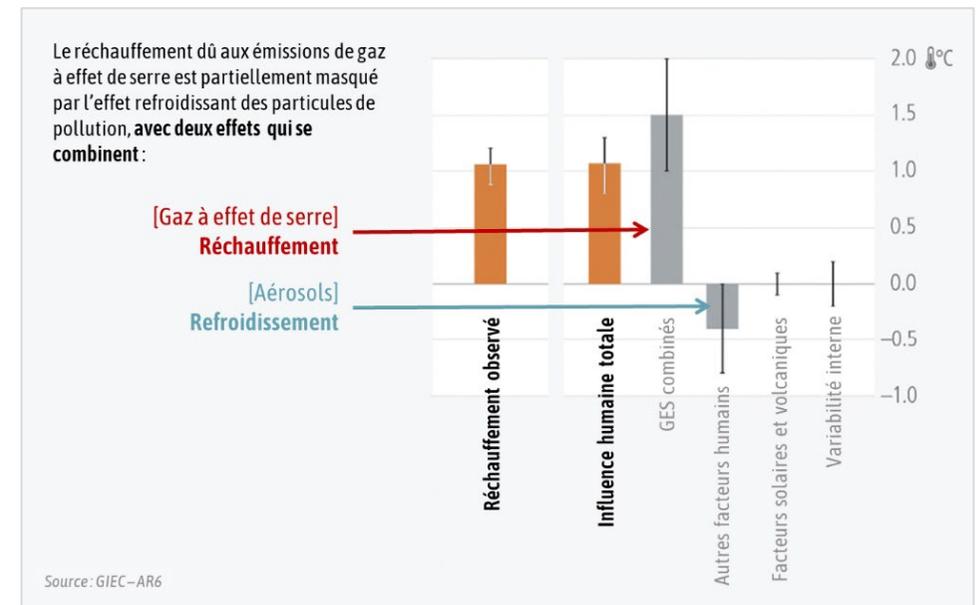
1. Introduction

Le réchauffement planétaire atteint 1,1°C pour la dernière décennie, donc 2011-2020, par rapport à l'enregistrement entre 1850 et 1900 (figure ci-dessous).



Les modèles climatiques démontrent que cette augmentation de température est intégralement liée à nos activités humaines.

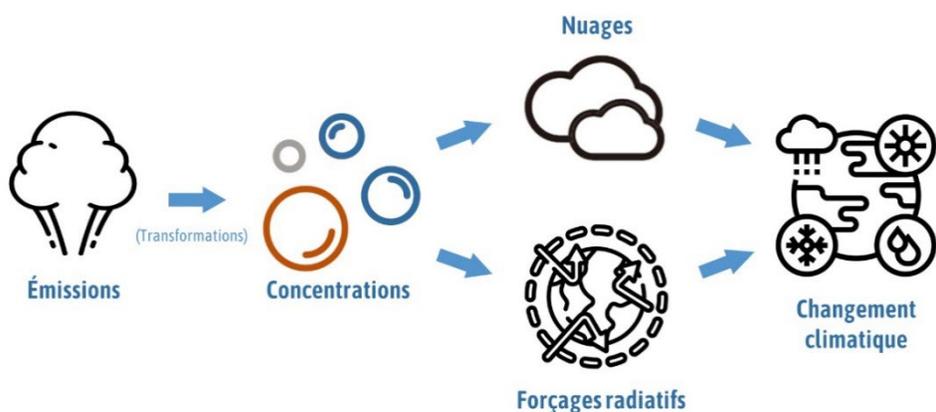
En pratique, il se décompose en deux signaux. Il y a d'une part un signal de réchauffement fort qui est lié à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Et il y a d'autre part une partie de ce signal qui est aujourd'hui masquée par la présence de petites particules qui sont des particules de pollution, et c'est la petite barre grise que vous voyez qui descend dans les valeurs négatives (figure ci-dessous).



2. Les gaz à effet de serre

Qu'est-ce qui se cache derrière cette augmentation de gaz à effet de serre et ce changement en quantité de particules dans l'atmosphère ?

Il faut comprendre que nos activités humaines conduisent à des émissions, donc à un flux de matières vers l'atmosphère. Ces émissions de composés vont pouvoir conduire à une modification de la concentration de ces composés, mais également parfois, au travers de transformations chimiques, à la création de nouveaux composés. On a donc une modification de la composition de l'atmosphère.

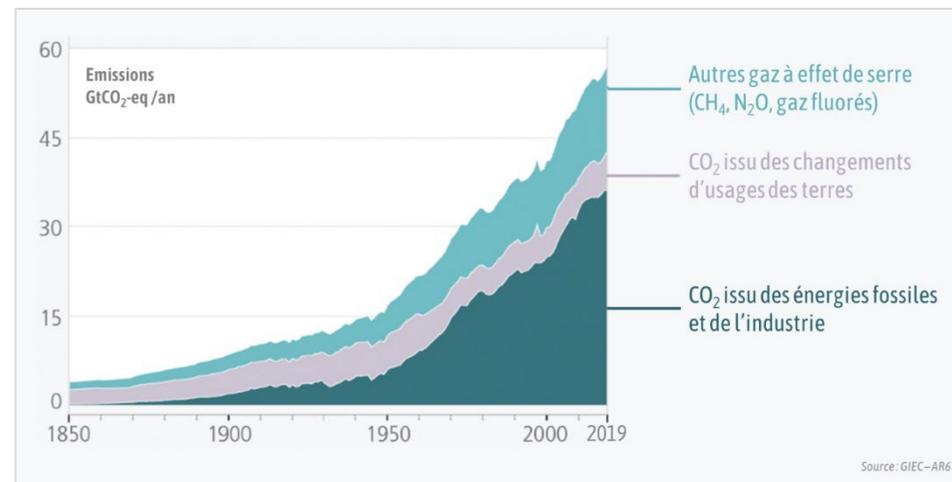


Source : S. Szopa, 2023

Ici, il s'agit d'espèces-traces, c'est-à-dire d'espèces qui sont en très petites quantités dans l'atmosphère, mais qui, par leur capacité à interagir, par exemple avec le rayonnement solaire ou réfléchi par la Terre, vont modifier le climat. C'est ce qu'on voit en bas avec le forçage radiatif, qui est lié à des modifications et des interactions entre ces composés et le rayonnement. On a aussi certains de ces composés, c'est le cas des particules fines, qui vont également pouvoir agir sur les nuages, modifier les propriétés des nuages, et, là aussi, venir modifier le forçage radiatif, mais également modifier d'autres paramètres du climat.

3. Evolution des émissions de GES

Sur cette figure, on voit représentée l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre entre 1850 et 2019.



Cette augmentation continue est liée à des tendances non soutenables à la fois dans la manière dont on produit de l'énergie, dont on utilise les terres, et à nos styles de vie qui conduisent à une surconsommation de l'énergie et de l'alimentation.

Ce qu'on voit en bas, le grand aplat vert sombre, ce sont les émissions de CO₂ qui sont liées à l'utilisation des énergies fossiles (le pétrole, le gaz, le charbon), et également, en très petite partie, à l'industrie comme par exemple avec des procédés comme la fabrication du ciment qui vont conduire à des émissions de CO₂. Vous voyez également en gris une émission qui est liée au changement d'usage des terres. Ce changement d'usage des terres est essentiellement de

la déforestation qui va conduire à un déstockage du carbone dans les sols. Une fois qu'on a converti des forêts en surfaces agricoles, par exemple, cela va conduire au relargage de CO₂ vers l'atmosphère. Enfin, la barre vert clair tout au-dessus correspond aux émissions des autres gaz à effet de serre. Ces autres gaz à effet de serre vont être par exemple le méthane et N₂O, le protoxyde d'azote, qui sont en grande partie émis par des procédés agricoles. Puis on retrouve les gaz fluorés qui, eux, sont émis par des activités plus spécifiques, et notamment par les besoins de réfrigération ou de climatisation.

4. D'où viennent les émissions de GES ?

Ces émissions de GES sont liées à des distributions très inégales à la fois dans le temps et dans l'espace. On voit ci-dessous le cumul historique des émissions de CO₂.

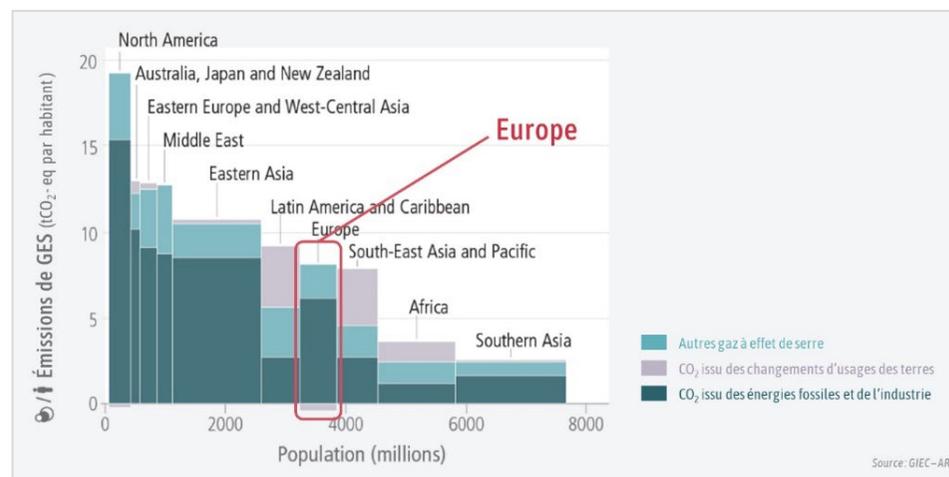
Cumul historique [1850-2019] des émissions de GES par région



Pourquoi regarder ce cumul historique ? En pratique, quand le CO₂ est émis dans l'atmosphère, une partie va être absorbée, aujourd'hui de l'ordre de 56 % du CO₂ émis est absorbé par la végétation terrestre et par l'océan, mais une partie du CO₂ émis va rester dans l'atmosphère pour des millénaires. Et aujourd'hui, nous subissons dans le 1,1°C de réchauffement une partie de CO₂ qui a été émise il y a fort longtemps, et notamment le CO₂ qui a été émis à l'ère préindustrielle.

Une autre inégalité concerne les émissions actuelles. C'est ce qu'on voit représenté ci-dessous. Ce sont les émissions, mais cette fois par personne et par région pour l'année 2019. Là encore, on peut voir une très grande disparité entre des pays développés qui vont avoir des émissions par personne qui peuvent, par exemple pour l'Amérique du Nord, avoisiner 20 tonnes de CO₂ par personne et par an, et des pays qui vont avoir des émissions plus faibles. Par exemple, l'Europe se situe autour de la moyenne mondiale, et la France est un petit peu au-dessus de l'Europe (environ 10 tonnes d'équivalent CO₂ par personne et par an).

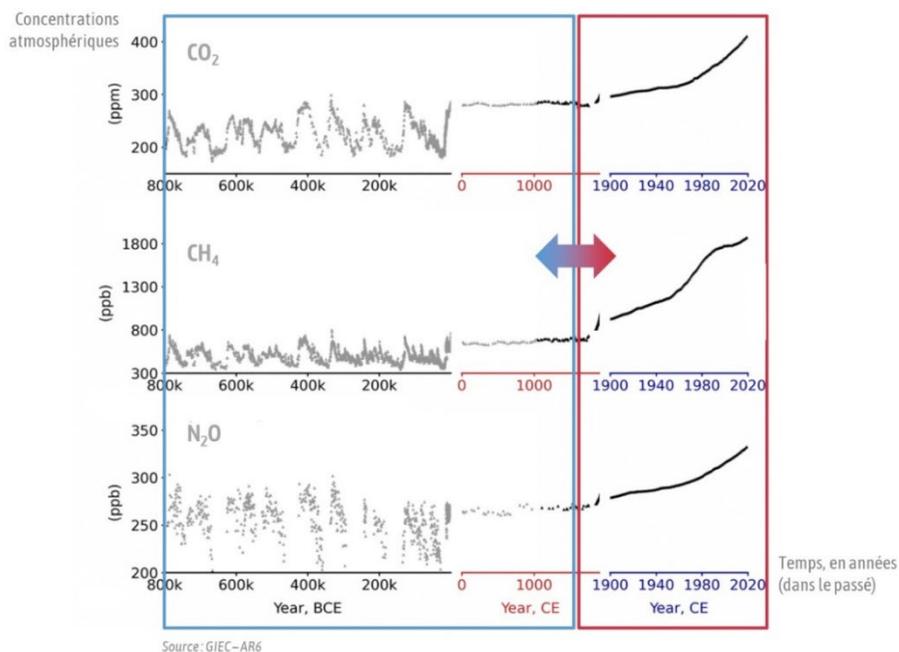
Émissions nettes de GES en 2019 par personne et par région



Cette forte disparité peut être traduite par le fait qu'on a 10 % des ménages les plus émetteurs qui représentent 40 % des émissions mondiales tandis que la moitié de la population de la planète ne pèse, elle, que 15 % des émissions mondiales.

5. Les concentrations de GES depuis 800 000 ans

Ces émissions continues de GES ont conduit à l'augmentation des teneurs en gaz à effet de serre. C'est ce qu'on voit représenté ci-dessous, où on voit dans un rectangle l'évolution récente depuis 1850 de la concentration du CO₂, du méthane et de N₂O, le protoxyde d'azote. On voit que cette évolution est très rapide sur ces 170 dernières années, et en particulier très rapide si on la compare à l'évolution de ces teneurs sur les 800 000 dernières années.

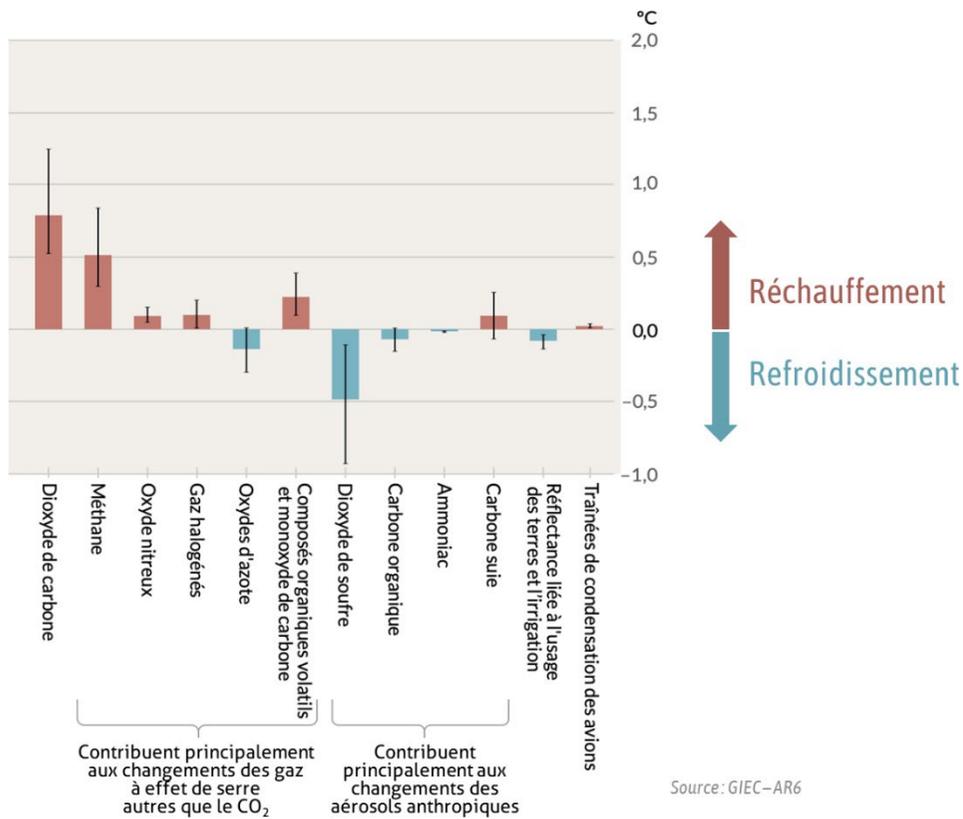


Comment est-ce qu'on connaît l'évolution de ces teneurs sur 800 000 ans ? Pour le passé lointain, on va utiliser les bulles d'air qui sont piégées dans les glaces et c'est ce qui nous permet de retracer l'évolution de la concentration de ces gaz à effet de serre sur la période d'il y a 800 000 ans jusqu'à à peu près 1850. Ensuite, on va avoir des mesures pour certains de ces gaz qui vont être de plus en plus denses au fur et à mesure du temps.

Aujourd'hui, on a des mesures satellites qui nous permettent de veiller à l'évolution des émissions et des concentrations de gaz à effet de serre en particulier. Cette modification de la composition induit un réchauffement du système climatique. En pratique, ces gaz à effet de serre vont venir piéger une partie du rayonnement qui est réémis en surface. Cette augmentation de la chaleur qui est piégée dans les basses couches de l'atmosphère va être en partie captée par l'océan qui va capter 91 % de l'énergie excédentaire dans le système.

6. Les GES : une diversité de composés

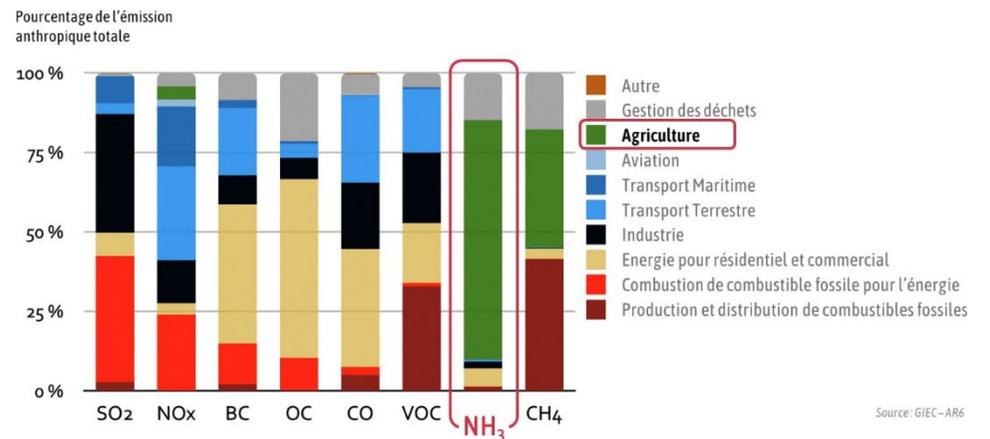
On voit sur ce graphique l'influence de chacun des composés émis sur la température de surface. C'est donc la manière dont le changement d'émissions entre le préindustriel et aujourd'hui est venu impacter la température de surface et participer à ce 1,1°C de réchauffement.



On voit deux composés très importants qui sont ceux qui agissent le plus sur le climat aujourd'hui, le CO₂ et le méthane, qui ont des caractéristiques très différentes. Dans le cas du CO₂, une partie de ces émissions est absorbée par la biosphère et par l'océan, mais ce CO₂, va en partie rester longtemps dans l'atmosphère. On dit qu'il a un effet cumulatif. Par contre, le méthane, lui, reste relativement peu de temps dans l'atmosphère, de l'ordre d'une dizaine d'années. L'implication est que si on baisse les émissions de méthane, on peut avoir un bénéfice relativement rapidement. Le méthane a des sources naturelles, mais dans ses sources anthropiques, donc d'origine humaine, il va avoir

principalement l'extraction et la distribution de combustibles fossiles et l'agriculture, notamment l'élevage et les rizières. Ces deux composés sont les deux composés qui ont le rôle le plus important, mais on a également toute une galaxie de composés qui, eux, vont avoir des rôles moins importants mais qui vont aussi être impliqués, par exemple, dans les problèmes de pollution de l'air.

Ces autres composés, qui sont importants, ont des sources qui vont être aussi très variables. C'est ce que vous voyez ci-dessous : la contribution pour chacun de ces composés des différents secteurs d'émission.



Si on regarde par exemple le SO₂, le dioxyde de soufre, qui va conduire à la formation des particules qui jouent un effet refroidissant sur le climat, on voit qu'il est principalement lié à l'industrie et à la combustion de combustibles fossiles, alors que, par exemple, on va avoir des composés comme le NH₃, l'ammoniaque, qui vont être émis de manière principale par l'agriculture et par l'épandage de fertilisants

qui vont conduire à cette émission de NH_3 , comme pour le N_2O dont je vous parlais précédemment, qui est un gaz à effet de serre qui reste, lui, plus longtemps dans l'atmosphère. Donc, avoir des mesures pour lutter contre les émissions de gaz à effet de serre principaux, comme N_2O , le méthane, ou le CO_2 , ça va signifier agir sur ces secteurs et aussi baisser mécaniquement la pollution de l'air.

L'observation du climat

Serge PLANTON

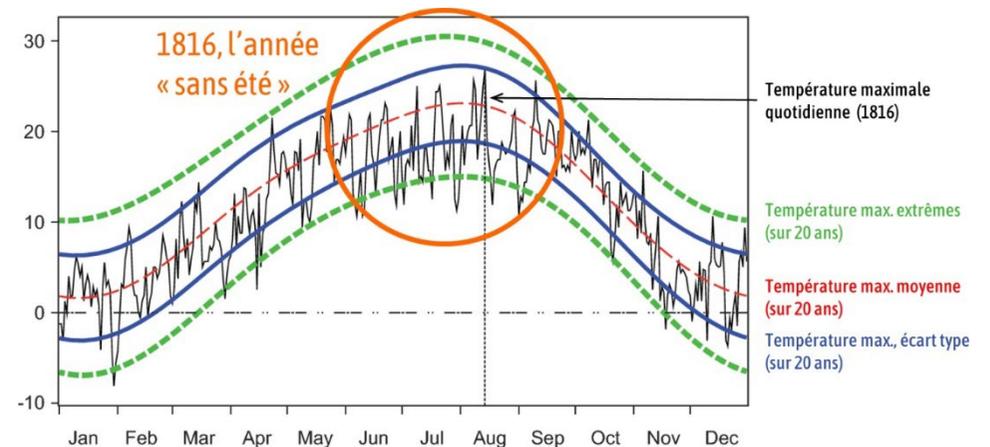
Climatologue, Membre de
l'association Météo et Climat



1. Différence entre météorologie et climat

Avant de parler de l'observation du climat, encore faut-il définir ce qu'est le climat. Plus particulièrement, je vais d'abord définir ce qui distingue la météorologie et le climat parce que ces deux termes sont parfois utilisés l'un à la place de l'autre.

Température maximale quotidienne à Genève en 1816 (°C)



Source : MétéoSuisse

Cette figure montre un enregistrement de températures à Genève à 14h pour chaque jour de 1816. Elle permet d'illustrer cette différence. La variabilité météorologique correspond à la variabilité d'un jour à l'autre de la température, tandis que la variabilité climatique est illustrée d'abord par son cycle saisonnier... mais pas seulement. On a tracé sur cette figure les moyennes et les écarts-types des températures, les courbes de couleurs rouge et bleue, calculés sur une période de 20 ans autour de l'année 1816 sans l'inclure. Les pointillés verts sont les valeurs extrêmes de cette période. Cette figure montre donc que l'année 1816 se distingue des normales de températures qui caractérisent le climat de l'époque, notamment pendant l'été qui était plus froid d'environ 4°C. Cette année 1816 a été vécue par des contemporains comme une année "sans été". Nous sommes ici en présence de ce qu'on appelle une anomalie climatique, puisqu'elle se produit à l'échelle d'une saison. On en connaît aujourd'hui l'origine : il s'agit d'une conséquence de l'éruption du volcan indonésien le Tambora en 1815 qui a refroidi le climat mondial à cause des particules qu'elle a engendrées dans la haute atmosphère. Une anomalie météorologique, comme une vague de froid, n'aurait, elle, duré que quelques jours.

Au-delà de cette illustration, une définition simple de la différence entre météorologie et climat peut être formulée ainsi : la météo étudie le temps qu'il fait et qu'il va faire en un lieu donné et un instant donné, typiquement sur quelques jours ; le climat s'intéresse aux conditions météo moyennes, calculées sur une région donnée, sur une longue période. La période recommandée par l'Organisation météorologique mondiale pour définir ces normales climatiques est, par convention, d'une trentaine d'années.

2. Observation du climat

Les grandeurs pertinentes pour caractériser le climat sont le plus souvent des variables de surface, telles que la température, les précipitations et la vitesse du vent. Mais les scientifiques élargissent la définition du climat à la description statistique du système climatique dont les évolutions influencent celles du climat à la surface de la Terre à différentes échelles de temps. Observer le climat est donc non seulement observer la surface de la Terre, mais aussi dans l'atmosphère, dans l'océan sur toute sa profondeur, dans les glaces sur continent et sur mer, dans la biosphère et dans les sols superficiels. Ces différentes composantes du système climatique interagissent en effet entre elles en échangeant de l'énergie, de la quantité de mouvement, de la vapeur d'eau, mais aussi du CO₂ et d'autres constituants, et influencent ainsi les évolutions climatiques.

La communauté scientifique internationale a mis en place un programme d'observation du climat à l'échelle planétaire qu'on appelle le Système mondial d'observation du climat. Il consiste notamment à définir les variables climatiques essentielles qui permettent de suivre les évolutions du climat dans toutes les composantes du système climatique. Ces variables doivent être pertinentes, techniquement observables ou dérivées d'observations par des méthodes scientifiques, s'appuyer sur des réseaux d'observation couvrant la planète, et avoir été recueillies sur des périodes de temps les plus longues possibles.



Source : WMO

Cette figure montre l'ensemble de ces variables, au nombre de 55, parmi lesquelles les températures sur continent et sur mer, le niveau de l'océan, l'étendue des glaces, celles des feux, la concentration du CO₂ dans l'atmosphère, etc. L'observation du climat nécessite donc une large combinaison d'observations multiples dans les différents milieux, s'appuyant sur des réseaux de coordonnées à l'échelle mondiale.

3. Traitement des séries climatiques

Les premières mesures instrumentales de variables climatiques datent du XVII^e siècle, avec notamment la série de températures de Paris reconstituée par Daniel Rousseau de 1658 à nos jours. Mais avant 1850, ces séries étant trop peu nombreuses ou trop mal réparties ; on

utilisait des marqueurs indirects du climat aussi appelés proxies. Il est ainsi possible de reconstruire la variabilité de la température moyenne de la Terre sur deux millénaires à partir d'archives naturelles comme, parmi d'autres, les troncs d'arbres qui ont conservé la mémoire des climats passés dans l'épaisseur et la densité de leurs cernes.

Il faut attendre 1856 pour voir apparaître le premier réseau d'observation météorologique géré par Emmanuel Liass, à l'Observatoire de Paris, sous la direction de l'astronome français Urbain Le Verrier. Les autres réseaux d'observation de l'atmosphère et de l'océan sont bien plus tardifs. L'estimation de variables de type climatique à partir d'observations de satellites ne date, quant à elle, que de la fin des années 1970.

Mais observer et recueillir les données ne suffit pas. Dans une série d'observations, par exemple de la température en un lieu donné, il faut tenir compte des perturbations de la mesure. Ces perturbations résultent, entre autres, des changements des instruments, de l'environnement de la mesure, du déplacement de la station, même dans un lieu à proximité.

L'image ci-dessous illustre à titre d'exemple le déplacement de la station de La Rochelle entre 1910 et 1999, avec un changement aussi très important du type de station de mesure, comme on peut le constater.

L'exemple des stations de mesure de La Rochelle

1910: Ecole Normale



1999: « Le Bout Blanc »



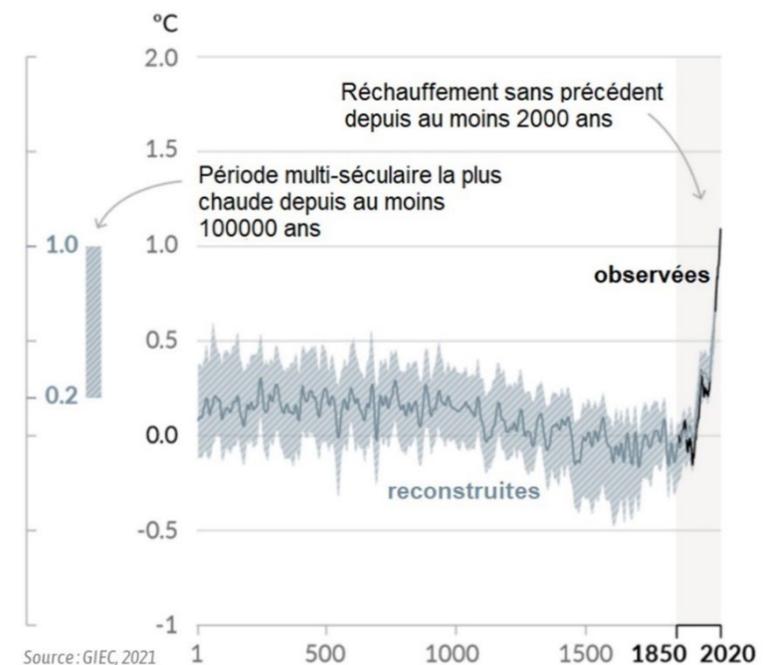
Source : Météo France

Un traitement statistique de chaque série par comparaison à d'autres séries observées voisines doit ainsi être réalisé chaque fois que possible. On parle d'homogénéisation des séries. Cette opération permet d'extraire le signal de variabilité climatique de séries de données contaminées par des artefacts de la mesure. Les observations satellitaires nécessitent aussi la prise en compte de l'évolution des capteurs embarqués, et donc, des étalonnages entre des séries d'observations issues de différents satellites. Ces opérations étant réalisées, il convient d'estimer avec précision toutes les sources d'erreur des reconstructions climatiques, incluant les erreurs non corrigées par l'homogénéisation ou l'étalonnage, les erreurs aussi liées à la répartition imparfaite des observations, les erreurs instrumentales et bien d'autres.

4. Exemple de l'évolution de la température moyenne mondiale

La figure ci-dessous illustre l'évolution de la température moyenne mondiale sur une période de 2 000 ans par rapport à la moyenne de 1850 à 1900, prise par le GIEC comme valeur préindustrielle. Elle est reconstruite à partir de proxies et, après 1850, à partir de la combinaison de réseaux multiples d'observation instrumentale et de reconstructions utilisant des techniques de modélisation qu'on appelle des réanalyses de données.

Variations de la température moyenne à la surface du globe observées ou reconstruites sur deux millénaires



C'est la meilleure estimation de l'évolution de la température moyenne mondiale telle qu'elle figure dans le premier volet du sixième rapport du GIEC publié en 2021. On y voit que les températures de la décennie 2011-2020 sont 1,1°C plus chaudes que les températures de la fin du XIX^e siècle, précisément entre 0,95 et 1,2°C plus chaudes. On y voit aussi que le réchauffement actuel est sans précédent depuis au moins 2 000 ans.

L'attribution du changement climatique

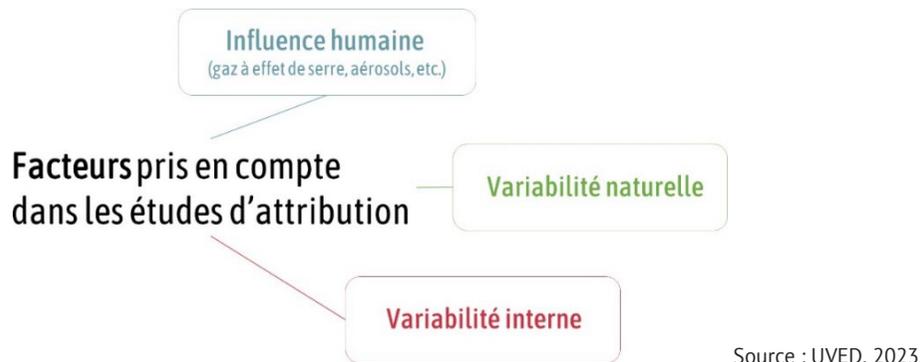


Aurélien RIBES,
Chercheur à Météo France

1. Définition

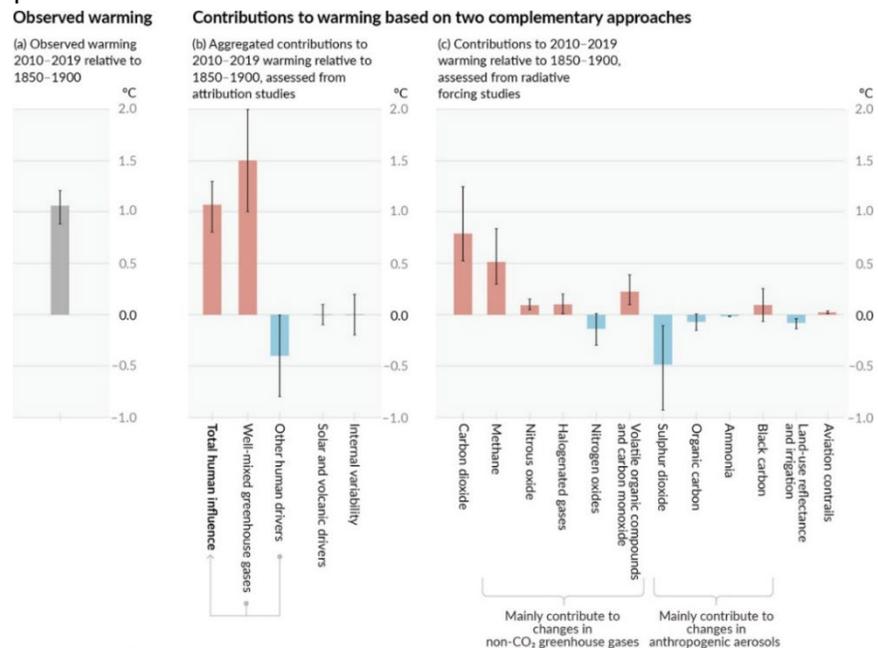
L'attribution du changement climatique est la science qui consiste à évaluer différentes causes du changement climatique, parmi lesquelles on distingue trois grands types de facteurs.

Il y a d'abord tout ce qui est lié à l'influence humaine sur le climat : les émissions de gaz à effet de serre, les émissions d'aérosols, des particules qui tendent à refroidir le climat, et d'autres perturbations liées aux activités humaines. Il y a ensuite les facteurs naturels qui perturbent l'état du système climatique, parmi lesquels les grandes éruptions volcaniques, les variations de l'activité solaire et, si on regarde sur des périodes de temps plus longues, les variations de l'orbite de la Terre. Il y a enfin la variabilité naturelle interne du climat qui correspond aux fluctuations météorologiques qu'on peut observer du jour au lendemain dans un lieu, mais également en moyenne annuelle planétaire, et qui vont moduler un petit peu la température de la planète.



2. La température moyenne planétaire

La variable la plus scrutée du point de vue de l'attribution est la température moyenne planétaire. Il s'agit de la température moyenne de l'air à proximité de la surface, moyennée sur l'ensemble de la planète.



Source : GIEC-AR6

Sur cette figure, la première barre indique le réchauffement mesuré de températures moyennes planétaires entre la dernière décennie, 2010-2019, et la période de référence préindustrielle, 1850-1900. Cette barre indique un réchauffement de 1,1°C entre ces deux périodes, à comparer à l'estimation du résultat de l'influence humaine au cours de la même période de temps, qui est la première barre en rouge et qui indique également un réchauffement d'à peu près 1,1°C. Cela signifie que la quasi-totalité du réchauffement observé depuis la période préindustrielle est attribuable à l'influence humaine sur le climat.

Au sein de cette influence humaine, on distingue généralement deux grands types de facteurs. Il y a d'une part l'augmentation de l'effet de serre par les émissions de gaz à effet de serre (la deuxième barre rouge sur la figure), avec un réchauffement induit par ces émissions estimé à 1,5°C et une incertitude de 0,5°C. Il y a d'autre part l'ensemble des autres perturbations humaines sur le climat, parmi lesquelles l'effet des aérosols qui est un refroidissement net d'à peu près 0,4°C. Si on additionne ces deux termes, on retrouve 1,1°C de réchauffement induit par les activités humaines.

À côté de ce terme lié aux activités humaines, on retrouve l'effet de la variabilité naturelle lié aux volcans et aux variations d'activité solaire qui est faible, proche de zéro, sur cette période de temps, et l'effet de la variabilité interne également faible sur cette période.

On a, sur le panel le plus à droite de la figure, le détail des contributions de différentes espèces chimiques, parmi lesquelles divers gaz à effet de serre (le CO₂, le méthane et d'autres), et

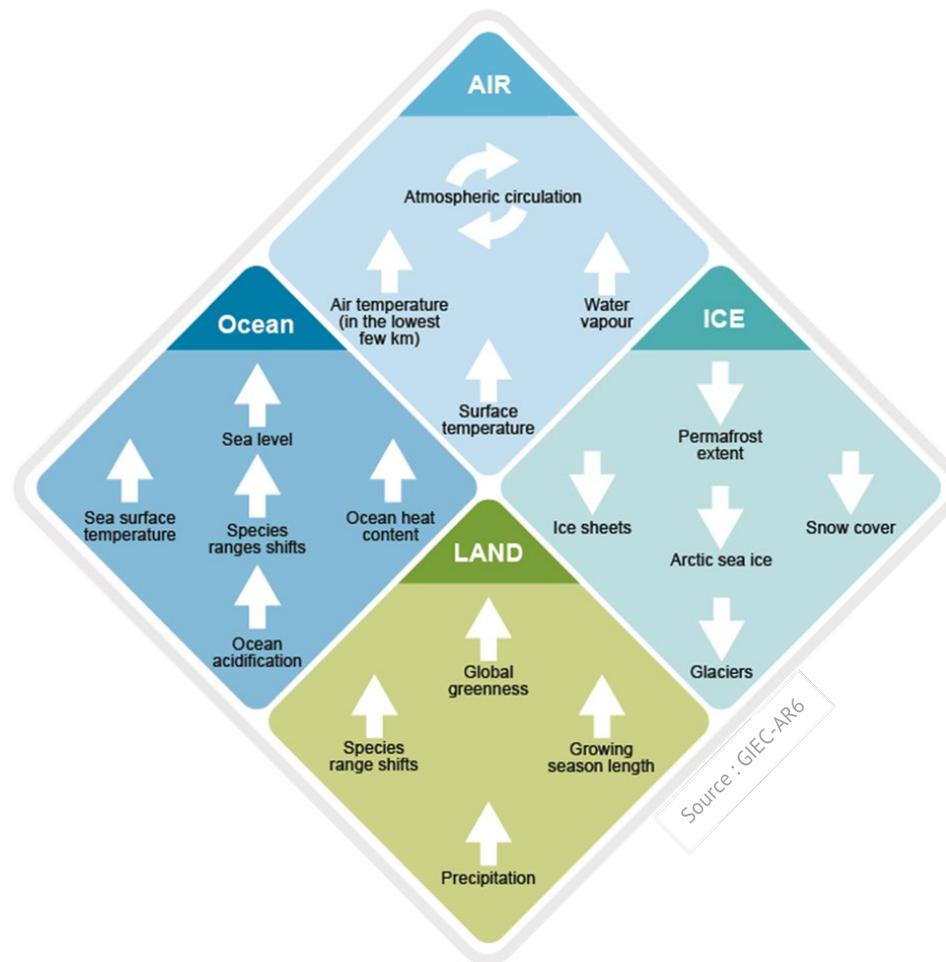
différentes espèces chimiques qui contribuent au terme des autres facteurs humains de perturbation du climat.

3. Autres variables suivies

Au-delà du résultat sur la température moyenne planétaire, on dispose désormais de différentes variables qui attestent du réchauffement en cours et qui concernent tout le système climatique : l'atmosphère, l'océan, la cryosphère, la glace, et les surfaces continentales.

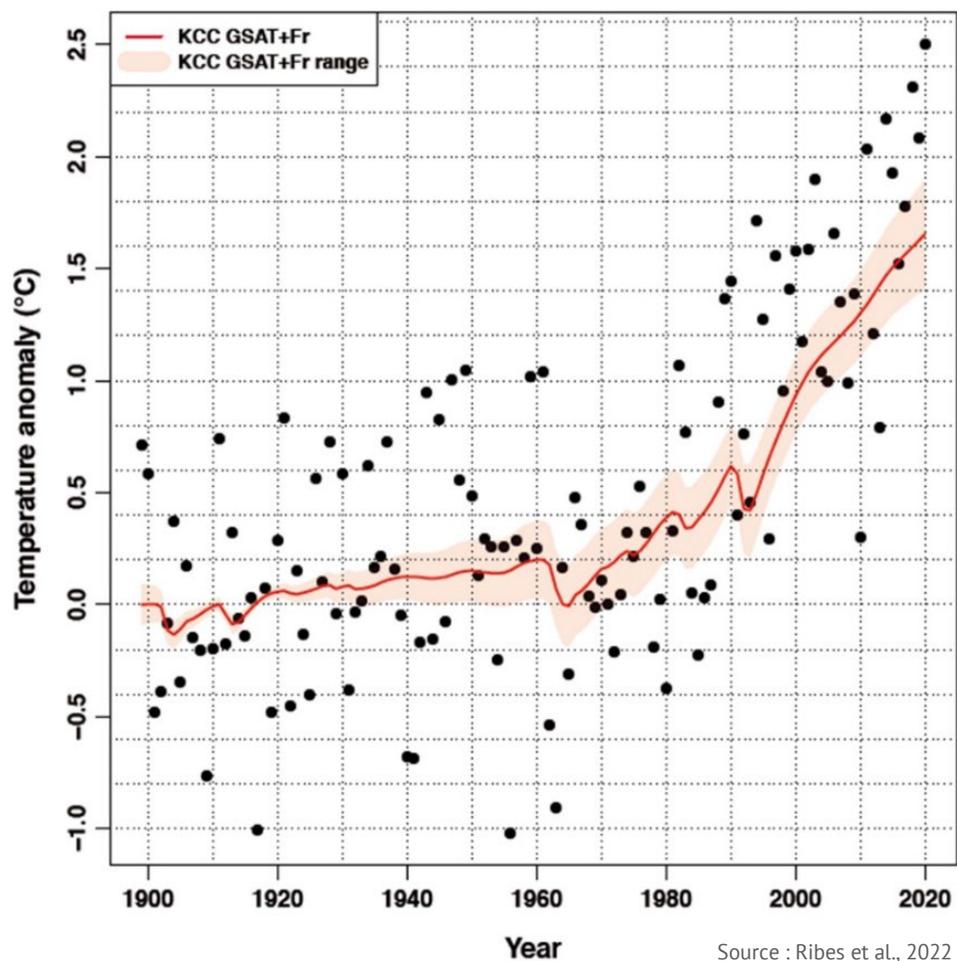
Dans l'atmosphère, outre la température à proximité de la surface, on peut parler de températures en altitude et du contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère qui augmente et qui est un témoin du réchauffement de cette atmosphère. Dans l'océan, on peut citer, parmi les variables les plus importantes, l'augmentation du niveau moyen des océans et l'augmentation du contenu de chaleur intégré sur la profondeur de l'océan. Pour la cryosphère, on peut citer la diminution de la surface de banquise, notamment dans l'Arctique, la diminution des surfaces enneigées dans l'hémisphère Nord en hiver, et la diminution des glaciers de montagne et des calottes polaires. Pour les surfaces continentales, on peut citer, par exemple, un allongement de la saison de croissance des végétaux et des modifications dans le régime des précipitations.

On dispose ainsi d'une vision générale d'un changement climatique lié aux activités humaines qui est désormais sans équivoque et qui concerne toutes les composantes du système climatique.



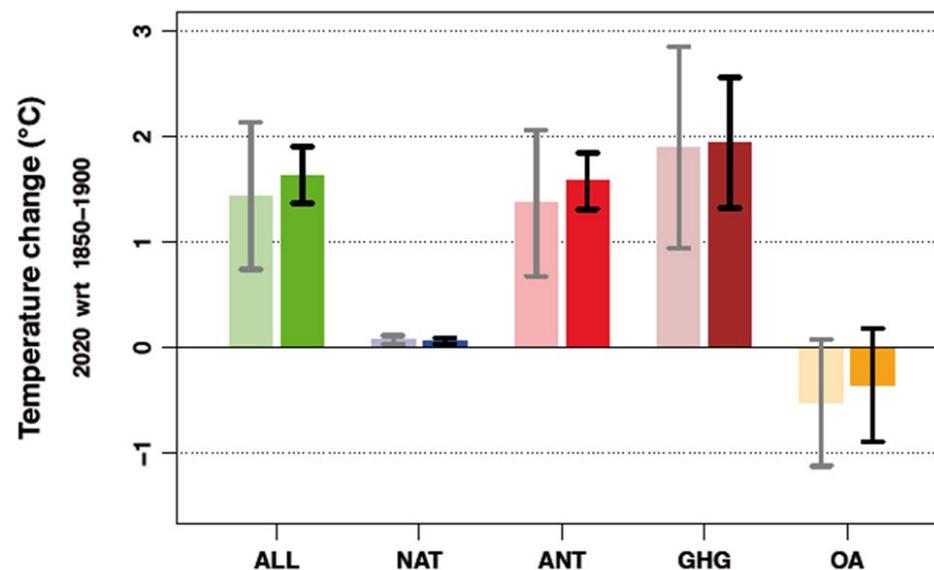
4. La température moyenne planétaire

En ce qui concerne plus spécifiquement la France métropolitaine, nous avons, avec des collègues du CNRM, publié l'année dernière, en 2022, une étude qui fait le point sur les changements passés et futurs, en termes de réchauffement et également en termes d'attribution.



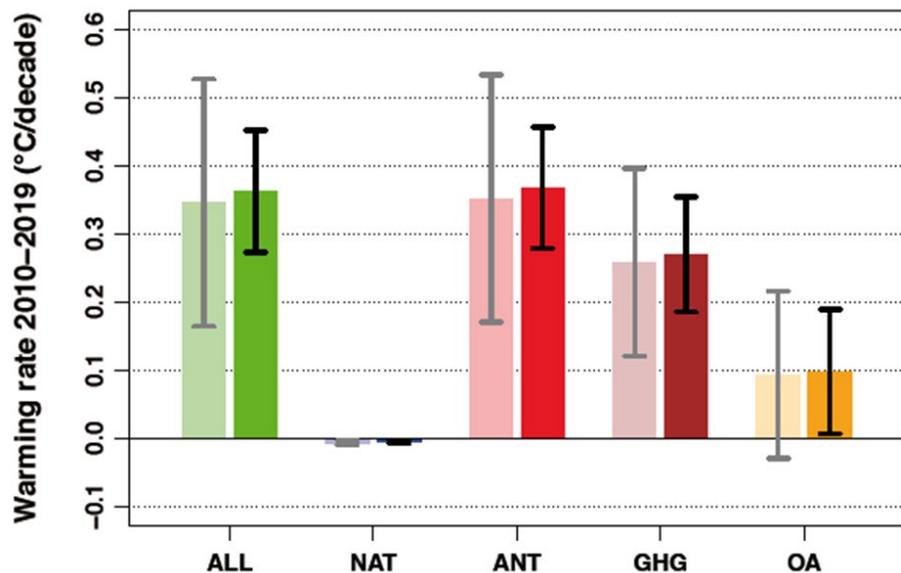
Le premier résultat est représenté dans cette figure avec, en noir, les données de températures moyennes annuelles en France métropolitaine depuis 1899 jusqu'en 2020, telles que mesurées par Météo France, avec ici une référence qui est la période 1900-1930. Puis en rouge, nous avons une estimation du changement climatique lié à l'ensemble des causes envisagées, humaines et naturelles, au

cours de la même période de temps, et qui indique un réchauffement d'à peu près 1,7°C en 2020 par rapport au début du XX^e siècle.



Source : Ribes et al., 2022

Si on cherche à faire une étude d'attribution sur ce réchauffement passé, on obtient les résultats indiqués sur cette nouvelle figure. La quasi-totalité de ce réchauffement, comme à l'échelle planétaire, est liée aux activités humaines, avec une contribution très faible, quelques centièmes de degré seulement, des forçages naturels. Puis, de nouveau, on peut faire une distinction entre l'effet des gaz à effet de serre, proche de 2°C de réchauffement sur cette période de temps, et l'effet des aérosols, qui est un refroidissement d'à peu près 0,3°C sur la période.

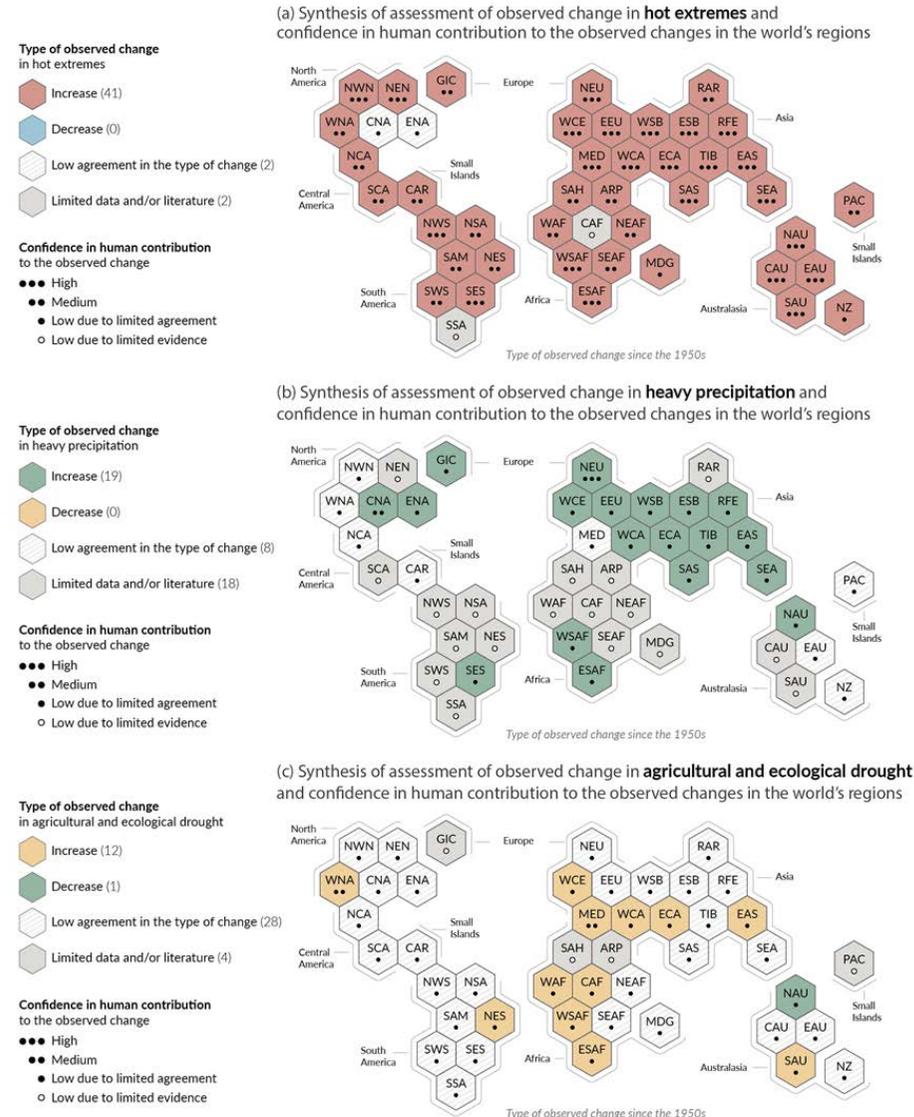


Source : Ribes et al., 2022

Maintenant, si on s'intéresse au rythme du réchauffement sur la dernière décennie, autrement dit la période 2010-2019, on a, cette fois-ci, de nouveau, une influence humaine qui explique l'intégralité du rythme du réchauffement, rapide, à peu près 0,36°C par décennie. Il est à la fois lié à l'augmentation des gaz à effet de serre, qui induit un réchauffement, et à la diminution des concentrations en aérosols dans cette région de la France et de l'Europe de l'Ouest, qui induit aussi un réchauffement et qui accroît le réchauffement en cours lié aux gaz à effet de serre.

5. Evolution des événements extrêmes

Au-delà des changements de climat moyens, les études d'attribution se sont aussi intéressées à l'évolution des événements extrêmes.



Source : GIEC-AR6

Dans la partie haute de cette figure, on a une version simplifiée de la carte du monde avec différentes sous-régions, qui montre les régions

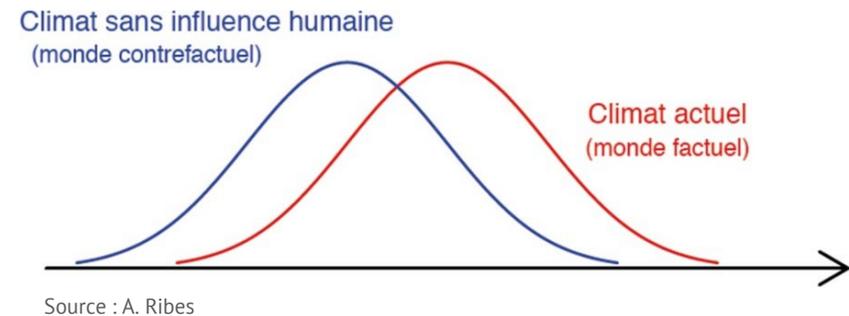
dans lesquelles les vagues de chaleur ont augmenté de façon significative en lien avec l'influence humaine sur le climat. On peut voir que dans la plupart des régions, on a déjà une augmentation claire des extrêmes chauds attribuables à l'influence humaine. Dans les cartes qui sont plus bas, on a, au milieu, l'effet de l'influence humaine sur les précipitations extrêmes. Toutes les régions en vert sont celles sur lesquelles on observe déjà une intensification des précipitations extrêmes en lien avec l'influence humaine sur le climat. Dans la carte du bas, on voit l'effet de l'influence humaine sur les sécheresses agricoles et écologiques, celles qui concernent un déficit d'eau dans le sol. De nouveau, certaines régions montrent déjà des signaux très clairs d'intensification de ces sécheresses que l'on sait relier à l'influence humaine sur le climat.

Pour la région WCE, "Western and Central Europe", qui concerne la France métropolitaine, on a à la fois des changements de canicule, de fortes précipitations et de sécheresse des sols d'ores et déjà attribuables à l'influence humaine sur le climat.

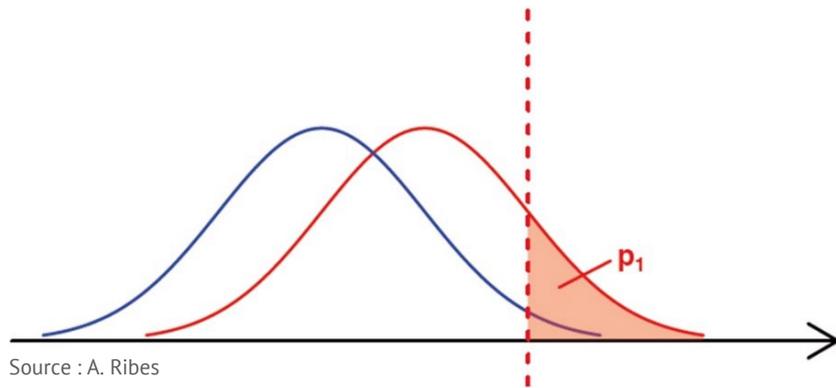
6. Survenue d'un événement extrême en particulier

Une question plus récente concerne l'influence du changement climatique et des activités humaines sur la survenue d'un événement extrême particulier : une canicule, un épisode de fortes précipitations. On se demande alors si la perturbation anthropique du climat peut être invoquée comme une cause de la survenue de cet événement particulier. C'est une question difficile, car le changement climatique

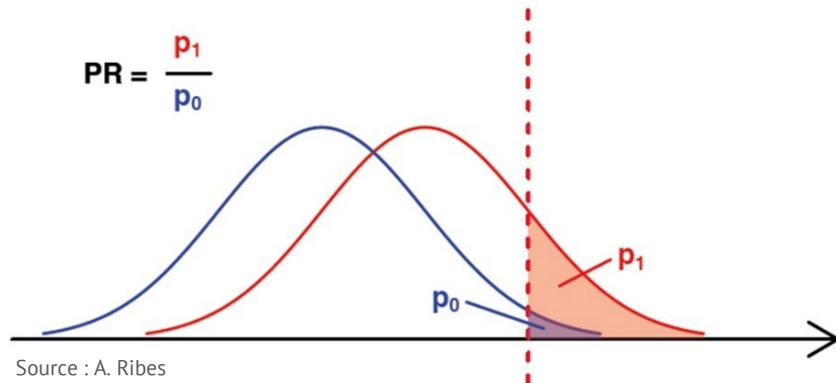
n'est jamais la cause unique de la survenue d'un événement particulier. On s'intéresse donc plutôt en général à décrire de quelle façon la perturbation humaine du climat a pu modifier les caractéristiques de l'événement observé : sa probabilité d'occurrence ou son intensité.



Pour décrire et illustrer la façon dont on fait ce type de calculs, on a sur cette figure deux distributions représentatives d'une distribution de températures, par exemple, dans le monde actuel, dit monde factuel, qui a vu l'influence humaine sur le climat, en rouge, et dans un monde contrefactuel qui n'aurait pas vu de perturbation anthropique du climat, en bleu. Quand un événement météorologique survient, la première question qu'on peut se poser, ici avec une valeur matérialisée par la ligne en pointillés, est : "Quelle est sa probabilité d'occurrence dans le climat actuel ?", notée ici P1, représentée par la région en orange.

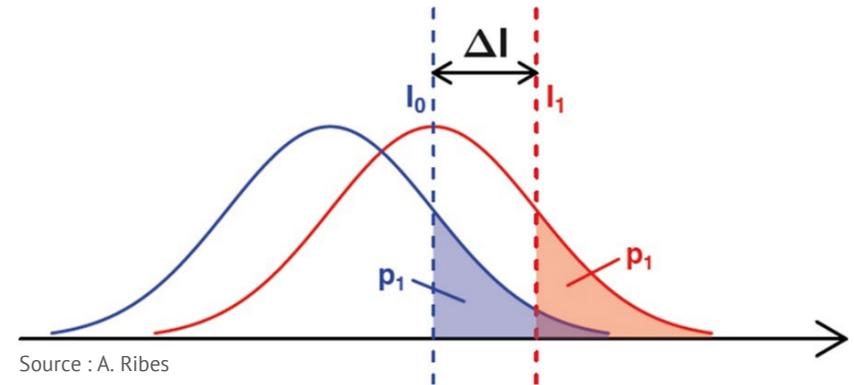


On peut comparer cette probabilité d'occurrence à la probabilité du même événement, même intensité, dans un monde contrefactuel qui n'a pas vu l'influence humaine, notée ici P0, en bleu, et comparer ces deux nombres en calculant par exemple un ratio, P1 sur P0, qui indique dans quelles proportions la probabilité a augmenté du fait des activités humaines et de l'influence humaine sur le climat.

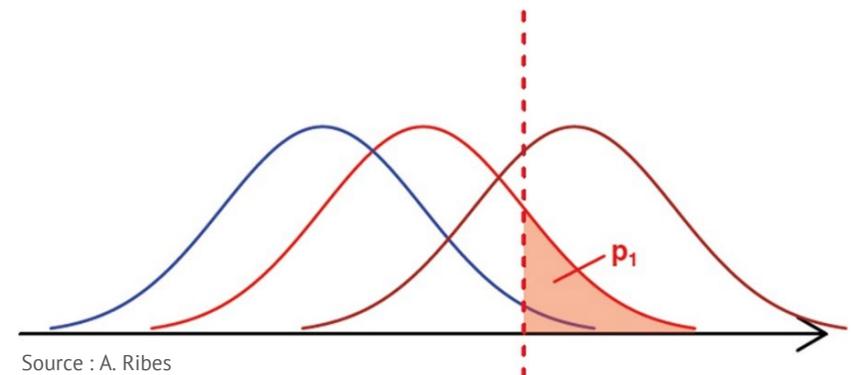


Un autre point de vue concerne le changement en intensité. Si on utilise le même graphique, on peut noter I1, l'intensité de l'événement observé dans le climat actuel et se demander quelle aurait été

l'intensité d'un événement de même probabilité d'occurrence P1 dans un climat sans perturbation humaine.



Cette intensité est notée I0 et on caractérise généralement la différence entre I1 et I0 comme l'effet des activités humaines sur l'intensité de cet événement.

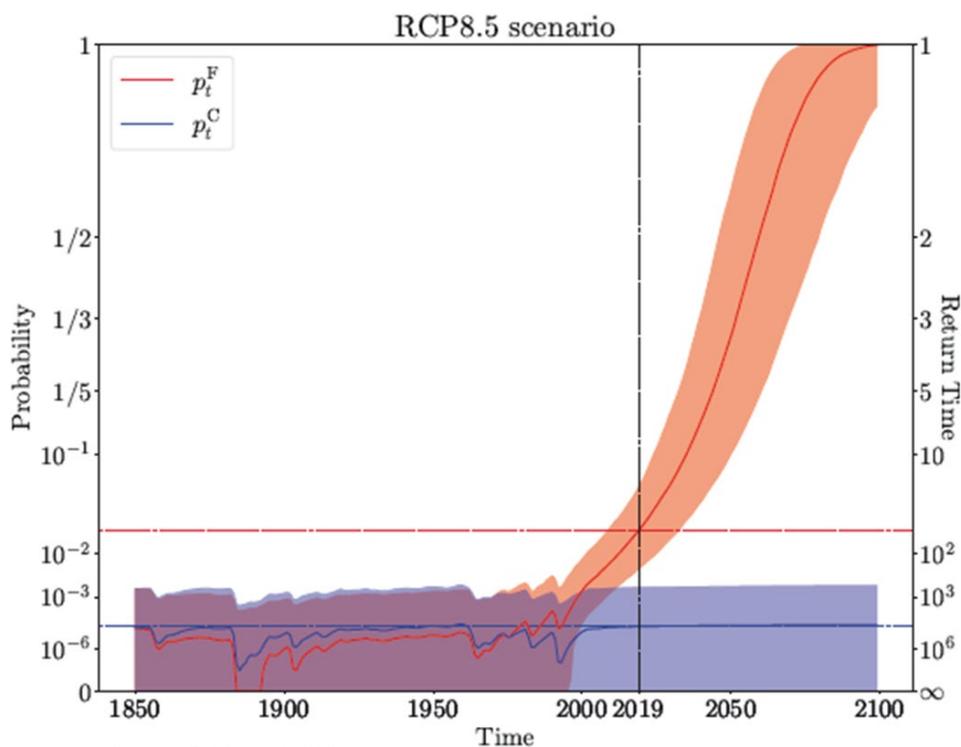


On peut étendre ce type de diagnostic, changement de probabilité d'occurrence ou d'intensité, au climat futur. Il s'agit alors de comparer

à une troisième distribution, ici en rouge foncé, représentative du climat attendu dans le futur sous une influence humaine renforcée.

7. Exemple de la canicule de 2019 en France

En guise d'illustration d'une étude d'attribution d'un événement particulier, on va s'intéresser à la canicule de juillet 2019 en France. Cet épisode a vu de nombreux records de températures maximales battus avec un remarquable 42,6°C à Paris, ce qui était inédit. On va définir cette canicule comme une température moyenne sur trois jours qui dépasse 28,7°C en moyenne pour toute la France métropolitaine.



Le graphique indique à droite la façon dont la probabilité d'occurrence d'un tel épisode chaud évolue avec le temps entre le XIX^e siècle et 2100, en rouge, sous l'effet de l'influence humaine, à la fois les perturbations historiques liées aux activités humaines et puis dans un scénario RCP8.5 qui est un scénario de fortes émissions de gaz à effet de serre.

On obtient, en faisant ce calcul pour 2019, une probabilité relativement petite d'avoir un épisode aussi chaud que cette canicule-là, estimée à 1 chance sur 40. Néanmoins, cette probabilité est déjà beaucoup plus grande que celle d'un même événement sans influence humaine qui est estimée être 600 fois plus faible, et, si on tient compte des incertitudes, au moins 20 fois plus faible. Sans influence humaine sur le climat, un tel épisode chaud était peut-être impossible, tout simplement. Si on raisonne cette fois-ci en termes d'intensité, le calcul indique que les activités humaines ont rajouté 2,1°C de réchauffement additionnel sur un épisode de ce type.

Enfin, un dernier constat concerne le rythme auquel la probabilité de ce type d'épisode augmente. Entre 2015, année de la signature des Accords de Paris, et 2021, c'est une multiplication par presque deux de la probabilité d'occurrence d'un tel épisode chaud.

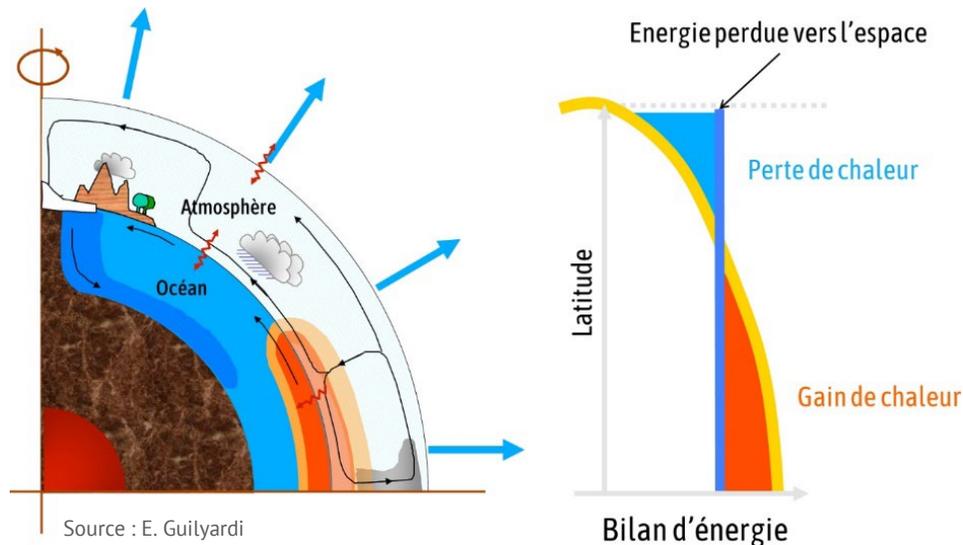
Cette étude sur la canicule de juillet 2019 en France est une illustration, mais on dispose désormais d'un large spectre d'études d'attribution d'événements spécifiques parmi lesquels des fortes précipitations, des tempêtes, des cyclones, des sécheresses et encore d'autres événements extrêmes.

La modélisation du climat

Éric GUILYARDI
Directeur de recherche au CNRS



1. Le système climatique



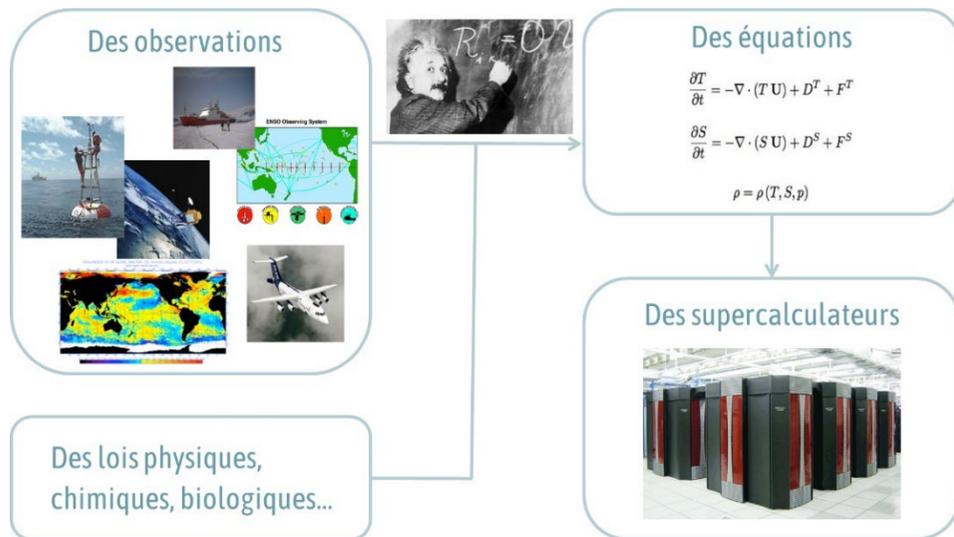
La machine climatique reçoit son énergie du Soleil. Puisque la Terre est ronde, il y a plus d'énergie solaire qui arrive près de l'équateur par unité de surface qu'aux plus hautes latitudes. Si on fait un bilan de chaleur, en fonction de la latitude, on voit que dans les régions tropicales, on a un gain de chaleur, puisque l'énergie qui est perdue à

l'espace est à peu près constante, ce qui est en bleu. Par contre, on a des pertes de chaleur vers les plus hautes latitudes. S'il ne se passait rien, il y aurait une accumulation de chaleur dans les tropiques et ça se refroidirait dans les plus hautes latitudes. Ce n'est pas le cas parce que la circulation de l'océan et de l'atmosphère, les courants océaniques et les vents atmosphériques, transportent cet excès de chaleur des tropiques vers les plus hautes latitudes. Donc, le climat est une énorme machine thermodynamique, un thermostat, à l'échelle de la planète, et c'est ça qu'il s'agit de modéliser.

Nous sommes aussi sur une planète extrêmement dynamique : il y a de nombreux cycles, le cycle de l'eau, le cycle du carbone, le cycle de l'énergie, et des flux entre les différentes composantes de ce système qu'il va falloir représenter.

2. Les ingrédients d'un modèle de climat

Il y a besoin d'un certain nombre d'ingrédients pour représenter un modèle de climat. D'abord, il faut des observations qu'on obtient depuis très longtemps maintenant à la surface de la Terre et de plus en plus ces dernières décennies. Cela va être des mesures de terrain avec un certain nombre d'instruments, mais aussi en allant dans des archives climatiques. Ensuite, les scientifiques, depuis encore plus longtemps, comprennent les lois de la physique, de la chimie, de la biologie, qui sont représentées par des équations. Vous avez ici les équations de Navier-Stokes qui représentent la loi d'écoulement d'un fluide, qui vont concerner l'océan et l'atmosphère dans un repère tournant qu'est le système terrestre. L'ensemble de ces observations, théories et modèles va être mis en œuvre sur des supercalculateurs.



Source : E. Guilyardi

3. La construction d'un modèle de climat

Pour construire un modèle, on va d'abord découper la Terre en boîtes tridimensionnelles qu'on appelle des mailles, à l'horizontale, quelques dizaines à quelques centaines de kilomètres de large, et aussi en altitude, en troisième dimension. On va faire la même chose dans l'océan et sur les surfaces continentales. À l'intérieur de ces mailles, il faut représenter les phénomènes de plus petite échelle : par exemple, ça va être la représentation des nuages dans l'atmosphère qui jouent un rôle climatique extrêmement important. Il faut représenter l'effet moyen sur une taille de maille. Sur les continents, là aussi, une maille, c'est grand, donc il faut représenter le relief, la végétation, les cultures, le cycle de l'eau, les rivières qui vont jusqu'à l'océan, l'évaporation et le retour en altitude et les précipitations sur la terre. On va aussi

représenter les activités humaines, les émissions de gaz à effet de serre, la déforestation ou d'autres impacts.

Dans l'océan, on va aussi découper en trois dimensions, jusqu'au fond de l'océan, à 4 000 m de profondeur, pour représenter les courants océaniques, avec ces équations de Navier-Stokes dont on a parlé. Il faut aussi représenter les phénomènes de sous-maille, comme les turbulences dans l'océan qui sont extrêmement importantes sur la circulation moyenne, et puis aussi le cycle du carbone, avec le plancton, le phytoplancton, qui participent à ce cycle du carbone.

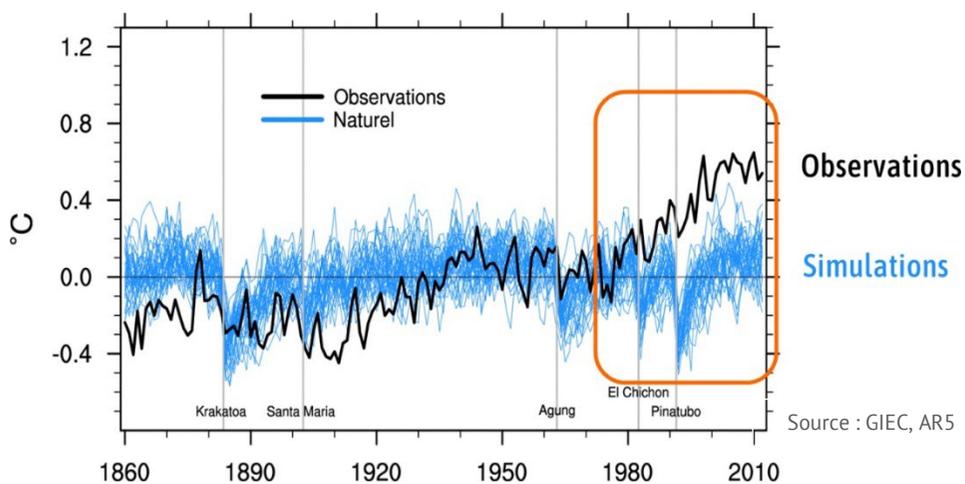
Ensuite, ce modèle est découpé en boîtes. Chacune de ces boîtes va partir sur le supercalculateur où on va faire des calculs en parallèle sur des machines. Un supercalculateur, ça fait deux terrains de tennis remplis d'armoires dans lesquelles la simulation va tourner de quelques jours à quelques semaines, voire quelques mois, pour nos calculs les plus complexes. A partir de ces modèles, on va pouvoir regarder toutes ces variables, tous ces champs qui ont été simulés, pour pouvoir les utiliser comme outils d'expertise ou de projection.

Aujourd'hui, l'océan global est bien représenté, de façon de plus en plus réaliste, par nos modèles, tout comme l'atmosphère. On n'arrive quasiment plus à distinguer une photo satellite qui représente la température de surface de la mer d'une simulation tellement le degré de réalisme est élevé. Ça nous permet de faire des prévisions de plus en plus précises.

4. L'usage des modèles de climat

Ces modèles sont absolument essentiels dans l'enquête qu'on a menée pour comprendre l'origine humaine du réchauffement climatique en cours. Vous avez ici à droite une tentative de simulation des derniers 150 ans, depuis le milieu du XIXe siècle jusqu'à aujourd'hui, en noir la courbe des observations de la température moyenne de la Terre, ou son anomalie, et en bleu une trentaine de simulations. Une trentaine de groupes font ces simulations dans le monde, dont deux en France.

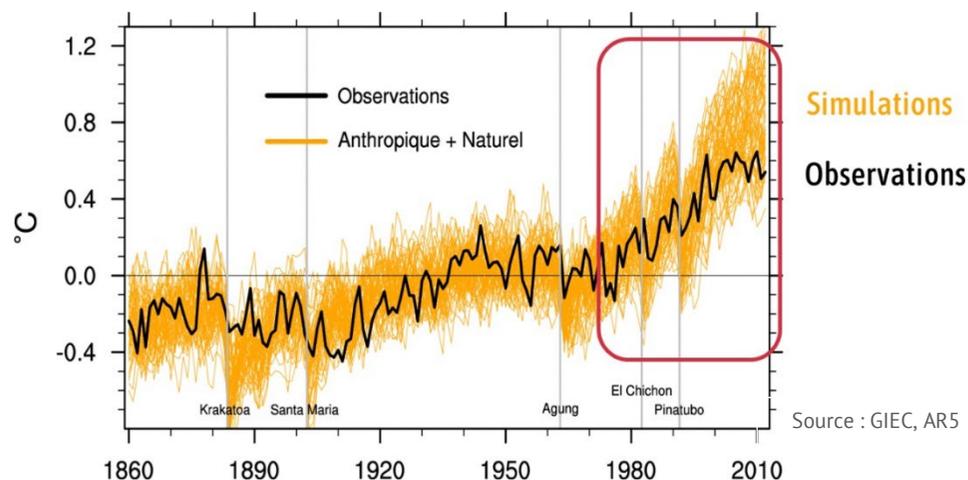
Simulation du climat avec les forçages naturels seuls



Vous voyez que jusque dans les années 1960-1970, on n'est pas trop loin des observations. Par contre on rate complètement l'augmentation quand on ne va utiliser que les forçages naturels, c'est-à-dire que les effets du Soleil ou le volcanisme. C'est uniquement

quand on rajoute les effets liés à l'homme, les gaz à effet de serre, dioxyde de carbone, méthane, mais aussi les aérosols ou la déforestation qu'on va pouvoir reproduire cette augmentation depuis les dernières décennies. C'est même aussi plus précis sur les décennies qui ont précédé. Ça fait partie des éléments de preuve qui nous ont permis de dire à un moment : l'activité humaine est en train de réchauffer le climat.

Simulation du climat avec les forçages naturels et humains

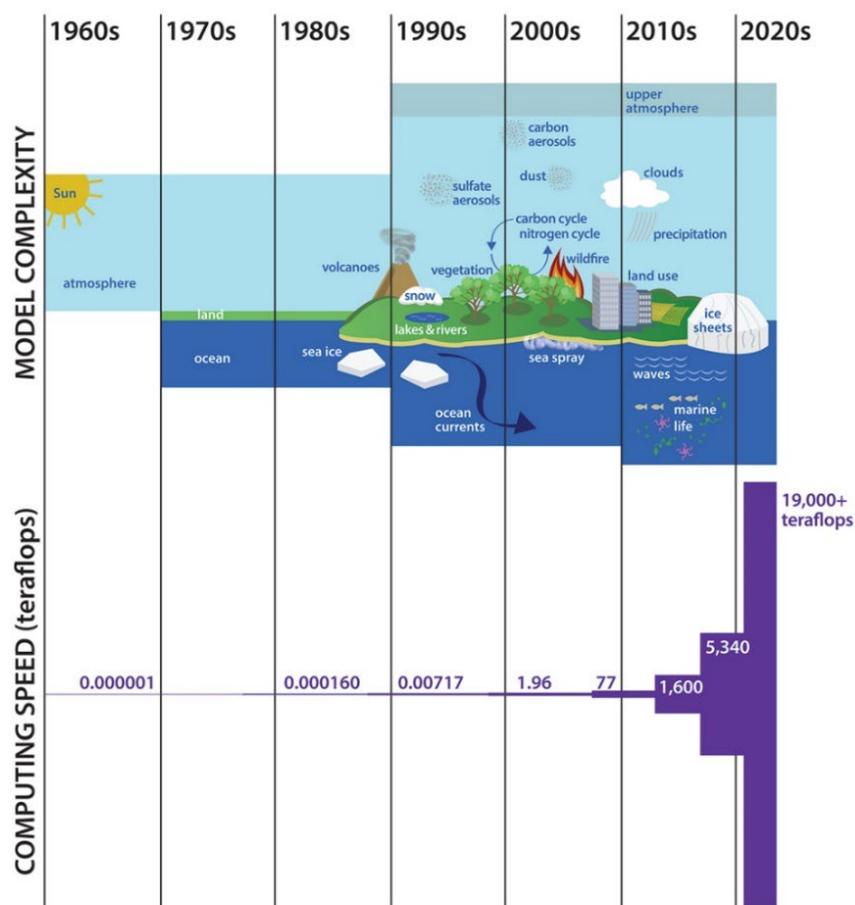


5. Quels enjeux pour les modèles de climat ?

Ces modèles de climat sont vraiment un outil essentiel pour nous. Ils sont d'une complexité croissante pour les rendre toujours de plus en plus fiables et précis. Cela se voit d'abord dans le nombre de composantes représentées. Dans les années 1960, on représentait

l'atmosphère, puis on a rajouté l'océan, puis la cryosphère, la glace de mer ou les glaciers continentaux, puis les calottes de glace, puis la biogéochimie dans l'océan ou la chimie atmosphérique, pour arriver aujourd'hui à des modèles d'une complexité énorme. Il y a entre 500 000 et un million de lignes de code informatique qui représentent ces modèles donc c'est de très gros instruments pour nos communautés.

La complexité



UCAR CENTER FOR SCIENCE EDUCATION L.S. Gardiner/UCAR ©UCAR 2021. Use of this image is permitted per the terms of use at scied.ucar.edu.

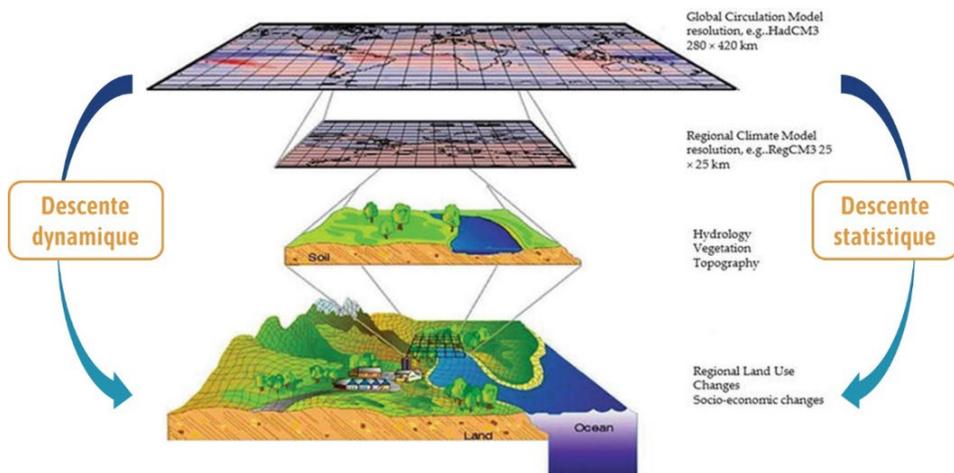
L'autre enjeu est la résolution spatiale : quand on passe d'une maille avec 200 km de résolution à une maille avec 100 km de résolution, le calcul va beaucoup plus coûter. Là aussi, on a besoin de supercalculateurs.

Un autre élément est la longueur de la simulation. Plus la simulation est longue, plus elle va coûter cher.

Un autre élément est l'ensemble de simulations. On a besoin de faire des dizaines, voire des centaines de simulations pour faire des statistiques sur ces simulations et pas juste une seule simulation. Suivant la question qu'on va se poser, on va favoriser l'une ou l'autre de ces sources de complexité. On voudrait les faire toutes en même temps, mais il faut faire des choix en fonction de la question scientifique posée.

Enfin, la décision se prenant au plus près du terrain, il y a besoin de faire une régionalisation, c'est-à-dire une descente en échelle, de passer de ces modèles globaux, à des mailles relativement grandes, à une information très locale, à l'échelle du kilomètre, voire en dessous. Pour ça, il y a deux moyens :

1. faire une descente en échelle dynamique, c'est-à-dire qu'on va réaliser un modèle à aire limitée qui aura une résolution plus importante,
2. faire une descente en échelle statistique, c'est-à-dire qu'on va trouver des liens statistiques entre la plus petite échelle et la grande échelle fournie par ces modèles globaux. Cette petite échelle est essentielle pour aider à la prise de décision de nos sociétés au niveau local.



Source : E. Guilyardi

Les scénarios climatiques



Sophie SZOPA
Directrice de recherche au CEA

1. Les scénarios climatiques : principe

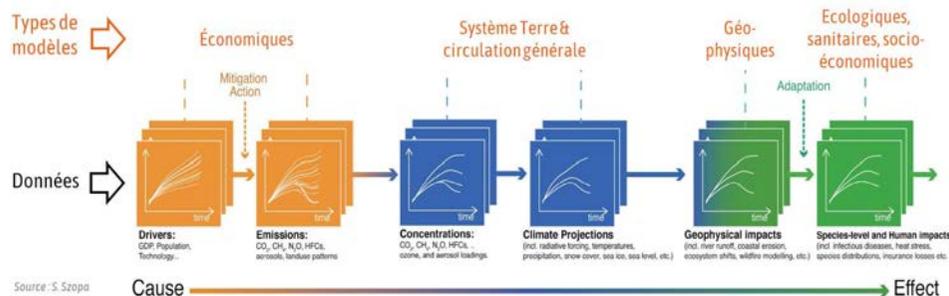
Pour caractériser les risques futurs et permettre de dimensionner l'adaptation, permettre également de savoir quelles sont les solutions d'atténuation, de limitation des émissions de gaz à effet de serre dans le futur qui sont acceptables pour, par exemple, respecter l'accord de Paris, nous avons besoin de faire ce que l'on appelle des projections futures. Pour cela, nous utilisons des scénarios.

Ces scénarios vont partir d'un ensemble d'hypothèses. Il peut s'agir par exemple d'hypothèses sur l'évolution de la population mondiale, d'hypothèses technologiques, d'hypothèses socio-économiques ou géopolitiques, avec par exemple soit une entraide entre les pays, soit un monde dans lequel on a des rivalités qui se renforcent et des nationalismes qui se renforcent.

A partir de ces grands jeux d'hypothèses, les économistes vont être capables de tirer une évolution des émissions de gaz à effet de serre par grandes régions. C'est ce qui va ensuite permettre, grâce aux modèles climatiques, de projeter l'évolution possible des paramètres physiques (ex : température) mais aussi d'autres paramètres, et également de

savoir comment ces changements s'opèreront dans le temps et dans l'espace. A partir de ces changements physiques, d'autres modèles vont pouvoir être utilisés pour caractériser l'évolution des impacts futurs.

Méthode d'élaboration des scénarios



2. Les scénarios d'émissions utilisés par le GIEC

Si l'on regarde les différents scénarios qui ont été utilisés dans le cadre de l'AR6, le sixième exercice du GIEC, on voit cinq grands types de scénarios. A chacun de ces scénarios correspond un profil d'émissions de dioxyde de carbone.

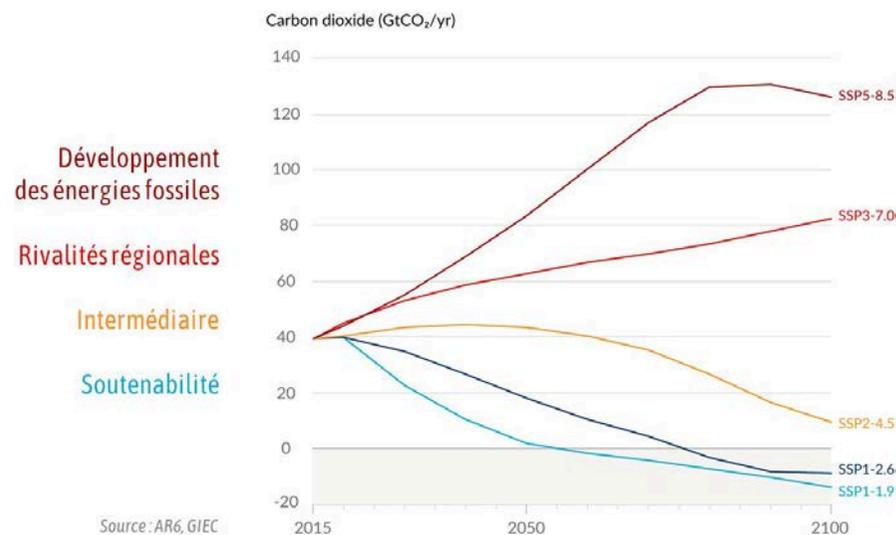
On a des scénarios, en bleu sur la figure ci-dessous, qui vont correspondre à des hypothèses de très forte soutenabilité, avec une forte coopération des pays pour déployer des politiques de limitation de gaz à effet de serre. Ces scénarios amènent à des émissions nulles, voire négatives à partir de 2050 ou 2070.

On va aussi avoir, en jaune, des scénarios intermédiaires qui correspondent à la trajectoire sur laquelle nous sommes aujourd'hui.

Ils correspondent à une stagnation, voire à une légère augmentation des émissions au moins jusqu'à 2050.

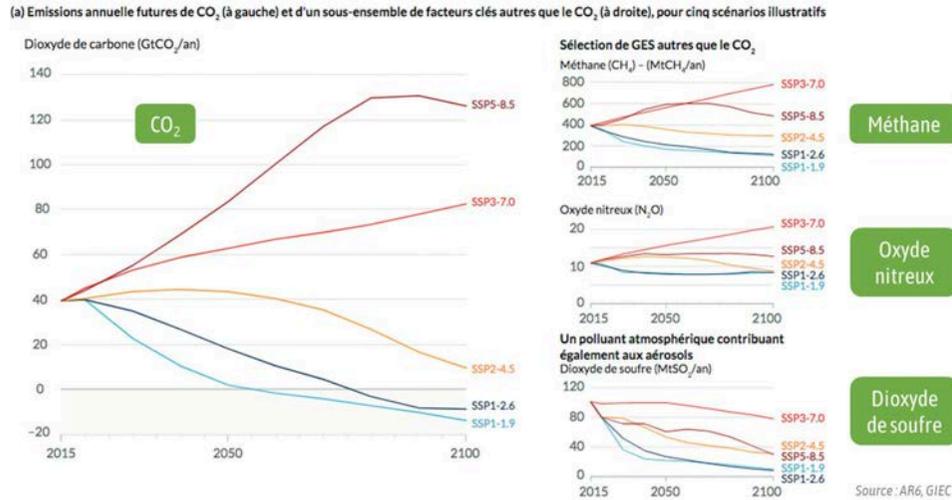
Enfin, on va avoir des scénarios hauts qui peuvent paraître potentiellement moins plausibles, puisqu'on a déjà pris certaines mesures politiques, mais qui ne sont pas complètement impossibles du point de vue physique. Il s'agit par exemple des scénarios dans lesquels on aurait un développement basé très fortement sur les énergies fossiles, qui est le scénario représenté en haut de cette figure.

Cinq scénarios d'émissions de gaz à effet de serre



On a besoin, même si tous les scénarios n'ont pas la même plausibilité et la même probabilité de se produire, de balayer une grande gamme de futurs possibles. Cela permet aussi de voir si, avec les modèles climatiques, on n'a pas de risque d'emballement, notamment pour les scénarios les plus hauts. Ce risque correspond à des effets amplificateurs par le jeu de rétroactions naturelles dans le système.

Profils d'émission de différents composés

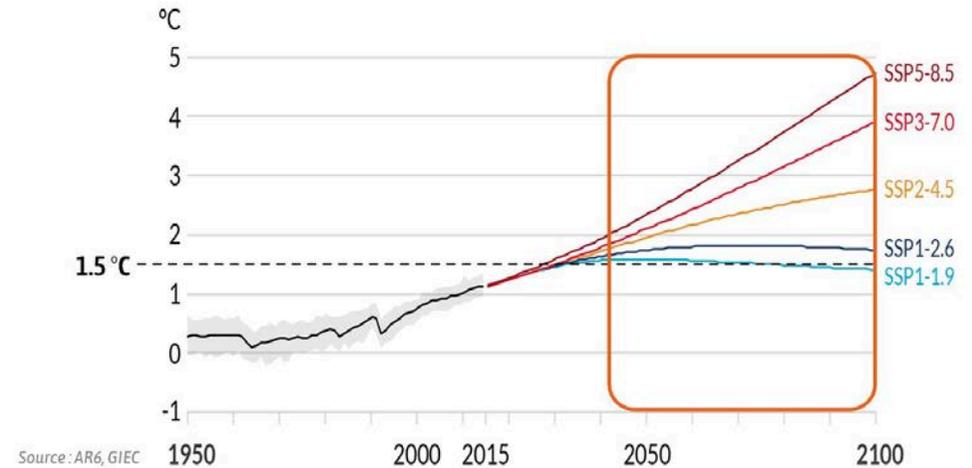


En plus des émissions de CO₂, on peut examiner les profils d'émissions d'autres gaz à effet de serre comme le méthane (CH₄), le protoxyde d'azote (N₂O), ou les profils de polluants atmosphériques comme le dioxyde de soufre (SO₂) qui lui va conduire à la production d'aérosols conduisant à un refroidissement de l'atmosphère (figure ci-dessus). Tous ces gaz et tous ces composés vont être pris en compte dans les modèles climatiques. Mais on voit qu'ils ne vont pas forcément avoir la même évolution dans le temps et dans l'espace, simplement parce qu'ils ne sont pas tous associés aux mêmes sources d'émission.

3. Les projections globales

A partir de ces profils d'émissions, les modèles climatiques permettent de projeter, par exemple, l'évolution de la température en moyenne mondiale (figure ci-dessous).

Evolution de la température globale pour cinq scénarios d'émissions



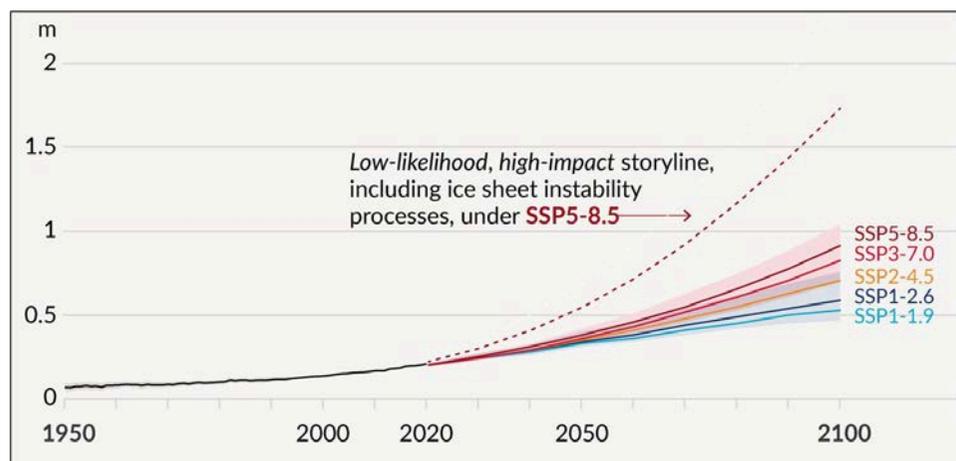
Lorsqu'on analyse les résultats de ces différents scénarios, on voit tout d'abord une augmentation dans les 20 prochaines années de la température mondiale, quel que soit le scénario d'émissions, avec vraisemblablement un dépassement de la température mondiale de 1,5°C au début de la décennie 2030. Cela ne signifie en aucun cas que réduire les émissions n'a pas d'effet ! C'est simplement que tant que l'on n'a pas atteint des émissions nulles de CO₂ et une baisse significative sur les autres composés, on continue d'émettre et de « rajouter » du réchauffement. Ce n'est donc pas lié à une inertie de la physique, mais bien à une inertie de nos systèmes économiques pour sortir de ces émissions carbonées.

En deuxième partie de siècle, on voit des évolutions qui peuvent être très variables suivant les scénarios : soit une stabilisation du réchauffement, soit une augmentation du réchauffement qui peut

avoisiner 3°C dans le cadre du scénario intermédiaire, voire dépasser 4°C dans les pires des scénarios.

On est également capable de déterminer l'évolution de différents paramètres physiques, comme par exemple l'évolution du niveau des mers (figure ci-dessous).

Évolution du niveau marin pour cinq scénarios d'émissions



Source : AR6, GIEC

Il s'agit de changements qui sont lents dans le système, car ils sont liés à une circulation océanique qui est lente et qui va répartir la chaleur sur des temps longs dans le système climatique. Les changements vont donc se poursuivre tout au long du siècle, même si on a une stabilisation de la température. En pratique, s'agissant de la montée du niveau des mers, on sait que c'est quelque chose qui va se poursuivre pendant des millénaires. Néanmoins, on voit que le fait d'être sur un scénario vertueux ou, au contraire, un scénario où on continue massivement d'émettre va changer la vitesse à laquelle ce niveau des mers va monter.

Cela change considérablement les possibilités d'adaptation pour les personnes qui vivent sur des littoraux.

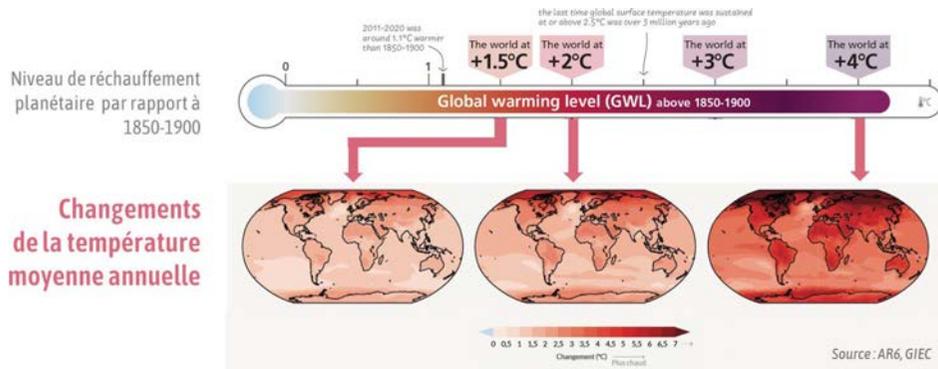
Vous voyez également, sur la figure, une ligne pointillée. Cette ligne représente une éventualité qui est de faible probabilité et de fort impact. C'est lié au fait que dans nos modèles climatiques, il y a des choses que l'on représente potentiellement moins bien parce que l'on manque d'observations, et parce que ce sont des processus très complexes non linéaires. On sait que potentiellement, il peut y avoir des non-linéarités qui sont mal représentées, par exemple de l'instabilité de calotte glaciaire qui se mettrait à fondre beaucoup plus rapidement que ce que nos modèles prévoient. Dans ce cas, on aurait une élévation du niveau des mers qui serait considérablement plus rapide.

C'est quelque chose qui est indispensable dans l'usage qui est fait des scénarios : montrer la dispersion et montrer des choses qui sont moins probables mais pas impossibles !

4. Les projections spatialisées

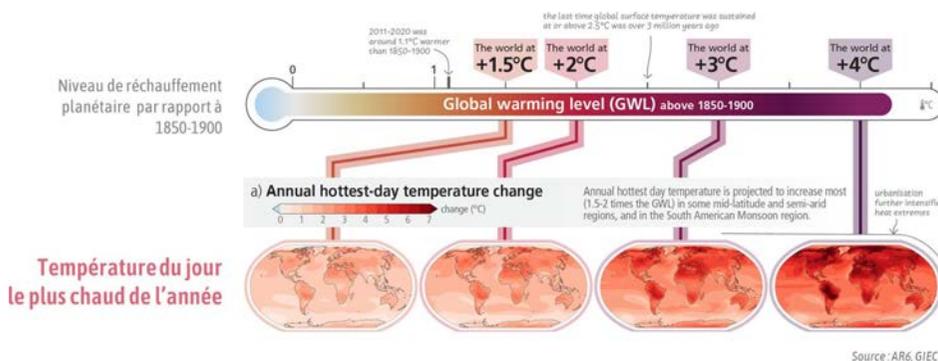
Les modèles climatiques nous permettent également d'avoir des changements spatialisés, c'est-à-dire des changements dont on voit la répartition dans l'espace. Cela permet par exemple de caractériser les changements pour différents niveaux de réchauffement. Sur la figure ci-dessous, on voit représenté les changements de la température moyenne annuelle pour différents niveaux de réchauffement.

Niveaux de réchauffement spatialisés pour différentes gammes de réchauffement planétaire



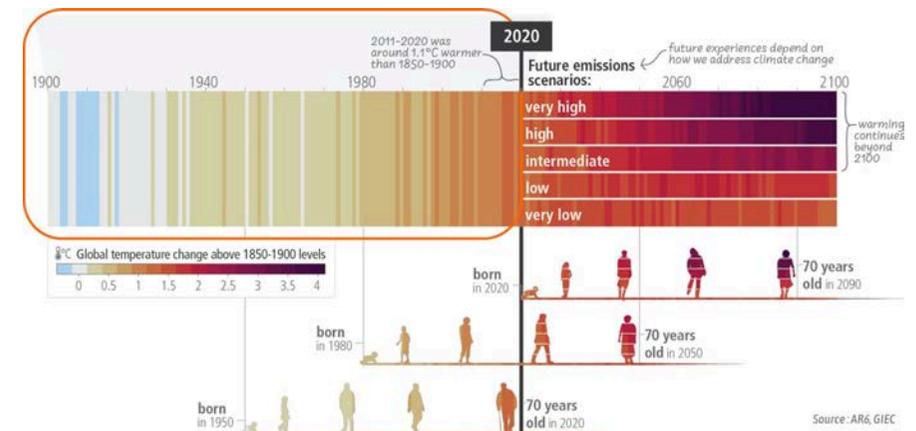
On voit par exemple une forte disparité entre ce qui se passe sur les continents et sur l'océan, avec un réchauffement systématiquement plus fort sur les continents. Par exemple, pour la France, on est à 1,8°C de réchauffement aujourd'hui, tandis qu'on est en moyenne mondiale à 1,1°C de réchauffement. On peut également voir un renforcement du réchauffement - dû à des rétroactions liées à la fonte des glaces - sur la zone arctique.

Évolution de l'occurrence des événements extrêmes pour différentes gammes de réchauffement planétaire



Quand on regarde les changements extrêmes, on a là aussi un renforcement important qui s'opère. Si on regarde par exemple la température du jour le plus chaud de l'année (figure ci-dessus), quand on passe d'un réchauffement global de 1,5°C à 2°C, cela ne signifie pas que le jour le plus chaud de l'année ne va être affecté que de 0,5°C ! Il pourra être affecté bien plus que ça, de l'ordre de 1°C. Ce renforcement des extrêmes est quelque chose d'important pour chaque niveau de réchauffement que l'on passe.

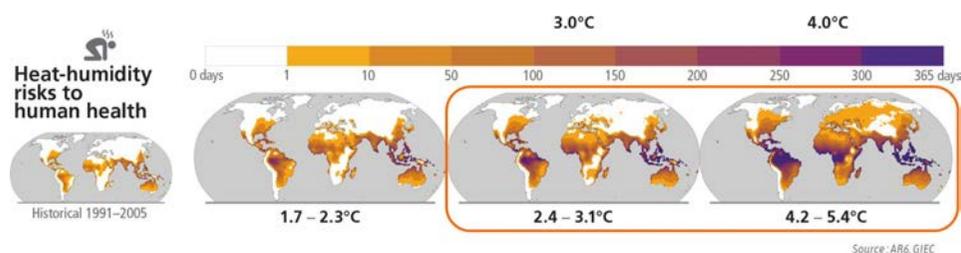
Évolution de la température à l'échelle de nos vies



Vous voyez ci-dessus une représentation qui correspond à quelque chose qui est fait pour parler à un public qui apprécie moins la représentation en courbes. Ce sont ce qu'on appelle des "climate stripes", pour lesquelles chaque bande verticale représente la température moyenne avec une couleur qui va s'intensifier vers le rouge pour des températures plus élevées. On retrouve, sur la période 1900-2020, l'augmentation observée de température. Puis on trouve

sur la droite les cinq scénarios d'émissions. Ce graphique montre bien un renforcement du réchauffement dans les 20 prochaines années, puis ensuite des futurs très différents. Il permet aussi de représenter ce que cela signifie à l'échelle d'une vie : soit une vie de quelqu'un qui serait né en 2020, soit en montrant la différence entre ce que peut vivre quelqu'un par rapport à ce qu'ont vécu ses grands-parents.

Evolution du risque de conditions « température + humidité » mortelles pour différentes gammes de réchauffement



Enfin, ces projections climatiques permettent de déterminer des risques et des impacts futurs. On voit ci-dessus un exemple qui est celui des risques pour la santé qui augmentent dans le futur pour différents niveaux de réchauffement. Il s'agit ici du nombre de jours par an où les conditions de température et d'humidité exposent les individus à un risque mortel. Cela correspond à des conditions dans lesquelles il va être très difficile de travailler en extérieur, par exemple pour faire de l'agriculture, construire des bâtiments ou même se déplacer en extérieur.

On voit dès la première gamme de niveaux de réchauffement qui est présentée, qui est 1,7-2,3°C, un renforcement très net du nombre de jours où les individus seront très fortement exposés en termes de

mortalité à cette chaleur excessive. Au-delà de 2,5°C, on voit des conditions dans l'équateur qui sont très difficiles plus de 250 jours par an, mais également en Amérique du Nord. On voit donc combien l'aggravation du changement climatique peut avoir un impact sur la santé, et combien ces projections peuvent permettre aussi d'anticiper et éventuellement de dimensionner de l'adaptation pour les paramètres pour lesquels il est possible d'avoir une adaptation.

Au-delà d'un certain niveau de température, on sait que beaucoup de solutions d'adaptation vont arriver à leur maximum et qu'on ne pourra pas protéger totalement individus et écosystème.

Objectifs d'apprentissage

- ▶ Appréhender les impacts actuels du changement climatique sur les milieux terrestres et marins ainsi que les projections futures
- ▶ Penser les impacts du changement climatique à plusieurs échelles d'espace et de temps
- ▶ Identifier plusieurs "points chauds" liés au changement climatique



Ressources vidéo

Vidéos sur le portail UVED
<https://me-qr.com/l/climat2-s2>

Partie 2. Effets du changement climatique sur les milieux terrestre et marin

Effets du changement climatique sur le cycle de l'eau

Hervé DOUVILLE
Chercheur au Centre National de la
Recherche Météorologique



Les changements du cycle de l'eau sont très variables, à la fois d'une région à l'autre ou d'une saison à l'autre, et ils ne sont pas uniquement causés par le changement climatique d'origine anthropique, mais aussi par les changements d'utilisation des sols et les prélèvements dans la ressource. Il y a une anthropisation croissante du cycle de l'eau et le changement climatique n'est qu'une facette des perturbations anthropiques de ce cycle.

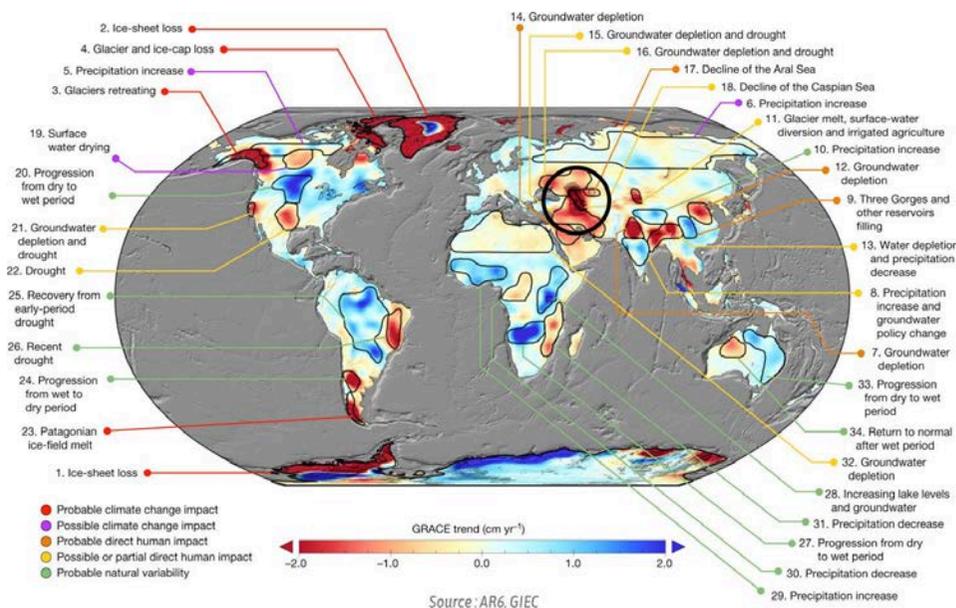
J'aborderai d'abord les changements observés et leur éventuelle attribution à des activités humaines, puis je présenterai brièvement les projections concernant l'évolution du cycle de l'eau au cours du XXI^e siècle.

1. Changements observés

On peut documenter ces changements sur la base d'observations *in situ* (pluviomètres, mesures de débit) mais aussi, depuis quelques décennies, sur la base d'observations spatiales. En particulier, depuis le début du XXI^e siècle, la mission GRACE permet de documenter l'évolution de l'ensemble des stocks d'eaux superficielles et

souterraines qui, dans certaines régions, représentent le stock majeur de ressources en eau.

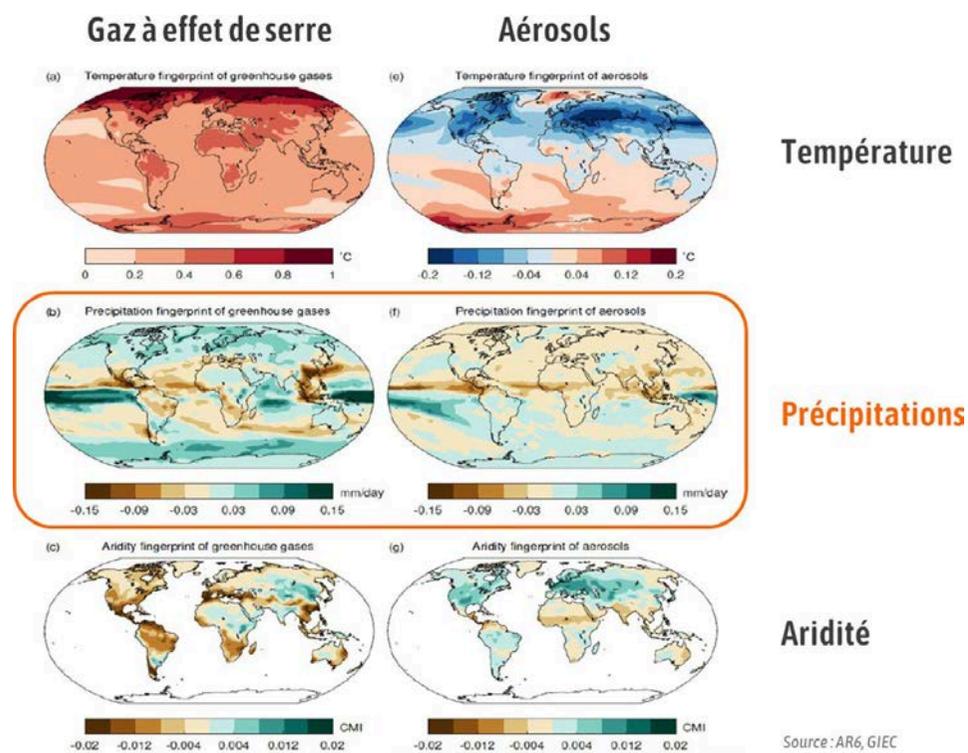
Variation des stocks de ressources en eau depuis 2002



Quand on regarde la carte de l'évolution depuis 2002, on voit que la réponse est très hétérogène d'une région à l'autre, avec des régions où la ressource augmente (en bleu) et des régions où elle diminue substantiellement (en rouge). C'est notamment le cas, par exemple, de la mer d'Aral. J'insiste encore sur le fait que ce n'est pas uniquement ou essentiellement dû au changement climatique, mais plutôt à des prélèvements excessifs en raison d'une riziculture intense dans la région.

2. Attribution des changements observés

Au-delà de la détection des changements observés, les modèles de climat permettent d'aller jusqu'à l'attribution des causes. On peut en effet les forcer par l'évolution observée des gaz à effet de serre et des aérosols anthropiques, et constater dans nos simulations qu'au cours du XX^e siècle, l'effet des gaz à effet de serre sur le cycle de l'eau a été en grande partie masqué par l'effet des aérosols anthropiques.



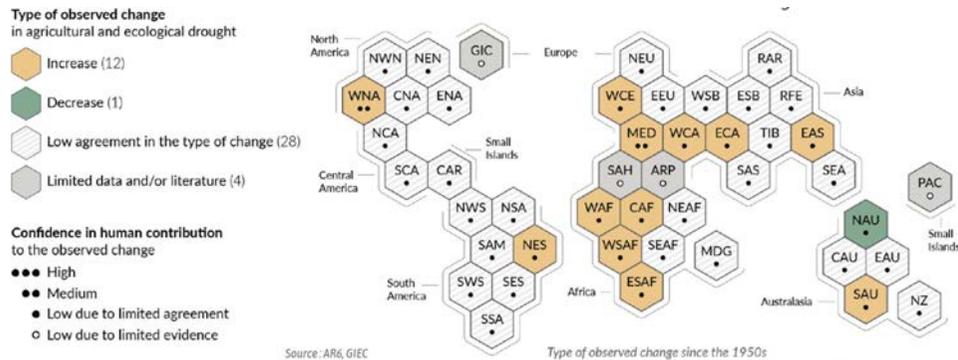
Les aérosols ont majoritairement pour effet de refroidir la surface des continents parce qu'ils réfléchissent une partie significative du

rayonnement solaire incident. Étant émis dans l'hémisphère nord, du fait de la présence en majorité des pays industriels dans cet hémisphère, cela a créé un différentiel de réchauffement entre les deux hémisphères, et cela a conduit à une migration de la zone de convergence intertropicale, notamment des climats de mousson, vers l'hémisphère sud. Par ailleurs, cet effet réfléchissant limite le réchauffement de surface, limite l'augmentation de l'évaporation en surface liée aux gaz à effet de serre, et donc limite l'aridification, y compris aux moyennes latitudes de l'hémisphère nord.

À partir de la fin du XX^e siècle, les efforts de dépollution atmosphérique ont permis de limiter les émissions d'aérosols anthropiques, alors que les émissions de gaz à effet de serre ont continué à augmenter. Dès lors, on comprend aisément que l'attribution des changements du cycle de l'eau aux effets anthropiques ait été délicate jusqu'à la fin du XX^e siècle et ne soit vraiment importante qu'à partir du début du XXI^e siècle.

Grâce à l'utilisation combinée des observations et des modèles, ces études d'attribution nous permettent notamment de dire que l'augmentation des pluies observées dans les hautes latitudes de l'hémisphère nord a une origine anthropique, que l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des plus fortes pluies à l'échelle quotidienne est également renforcée par les activités humaines, et, par ailleurs, comme on le voit sur la figure ci-dessous, que la fréquence et l'intensité des sécheresses agricoles dans certaines régions du globe (représentées par des hexagones) a également augmenté, notamment sur l'ouest de l'Europe ou le pourtour méditerranéen, et ceci en grande partie en raison du changement climatique d'origine anthropique.

Évolution des sécheresses agricoles

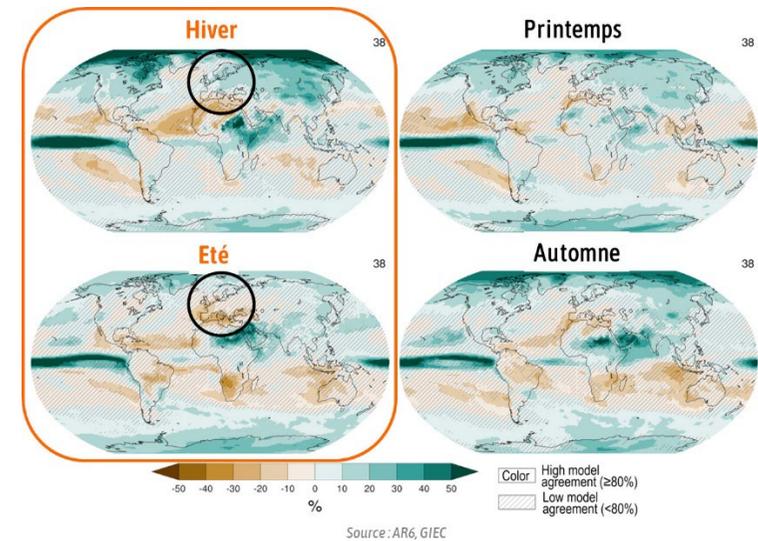


3. Projections

Pour décrire et documenter ces projections, on s'appuie uniquement sur la modélisation numérique et notamment des simulations pilotées par différentes évolutions envisagées pour les concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols anthropiques, ceci selon différents scénarios socioéconomiques.

Si on considère par exemple un scénario médian, qu'on qualifie de scénario SSCP2-4.5 dans le jargon du GIEC, on constate concernant l'évolution saisonnière des précipitations des changements spatiaux très hétérogènes d'une région à l'autre, avec une augmentation des pluies à la plupart des saisons aux hautes latitudes. Mais si on se focalise sur l'Europe (voir figure ci-dessous), celle-ci est essentiellement constatée en hiver aux hautes latitudes et apparaît très peu en été. Inversement, en été, on a une forte diminution des précipitations sur le sud de l'Europe. On constate donc au niveau européen une augmentation de la saisonnalité de la pluviométrie avec plutôt plus de pluie en saison des pluies et moins de pluie en saison sèche.

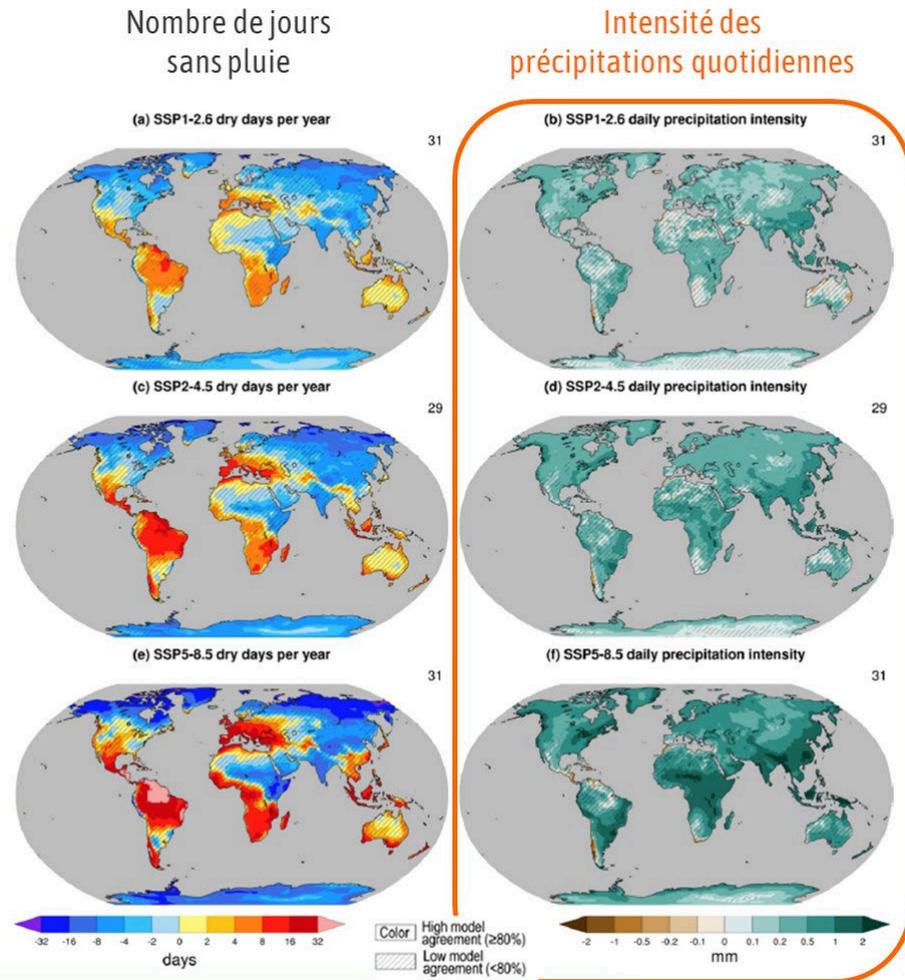
Changement des précipitations saisonnières moyennes



Si on regarde plus globalement à l'échelle de la planète, on voit que de nombreuses régions subtropicales déjà semi-arides vont voir leur pluviométrie diminuer à la plupart des saisons, et donc de manière annuelle. C'est le cas non seulement du pourtour méditerranéen, mais également de la Californie, de l'Afrique du Sud, du Chili, et d'une partie de l'Australie. Tous ces climats semi-arides vont malheureusement devenir encore plus arides dans un climat plus chaud, ce qui va évidemment poser des problèmes, notamment pour la ressource en eau liée à l'agriculture.

Les modèles nous fournissent également l'évolution des précipitations à l'échelle quotidienne. On peut s'intéresser au nombre de jours sans pluie régionalement ainsi qu'à l'intensité moyenne des précipitations, c'est-à-dire à la précipitation annuelle non pas divisée par le nombre total de jours, mais par le nombre de jours de pluie. On considère qu'un jour de pluie est un jour où la précipitation est supérieure à 1mm.

Changement, en moyenne annuelle, du nombre de jours sans pluie et de l'intensité des précipitations quotidiennes

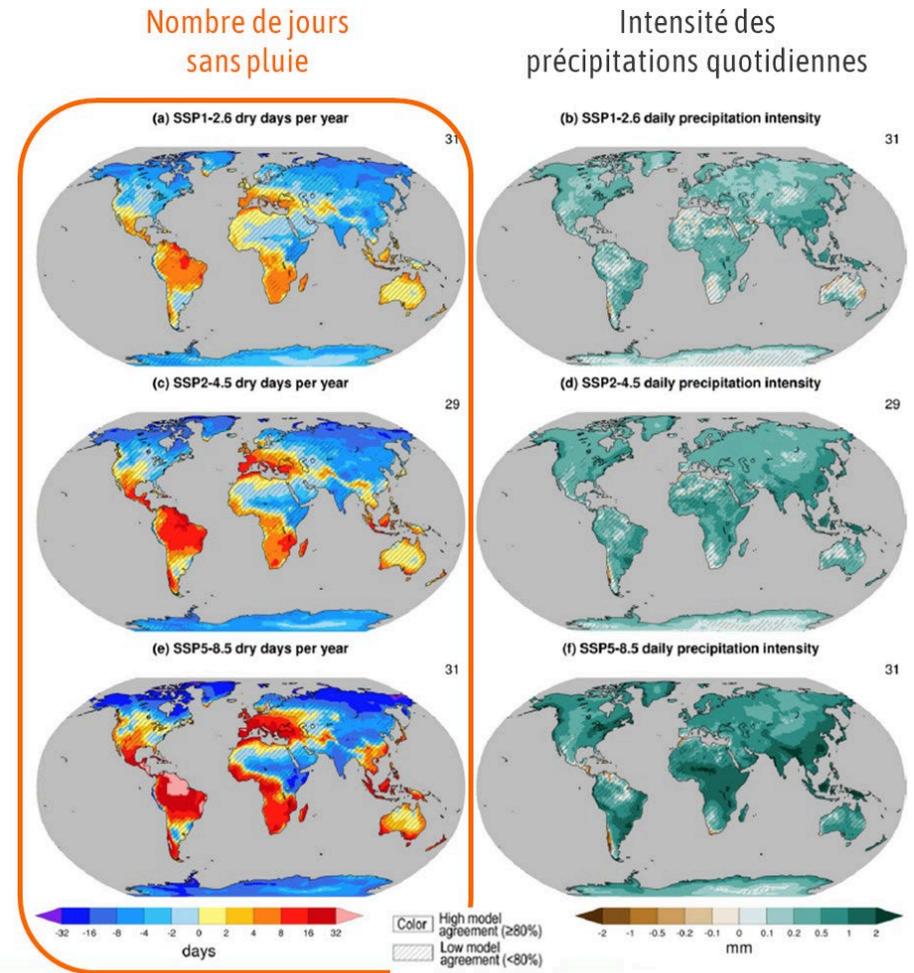


Source : AR6, GIEC

Si on se situe sur un scénario médian, on constate que l'intensité moyenne des précipitations va augmenter de manière quasi uniforme sur l'ensemble du globe (figure ci-dessus). Cela va concerner à la fois

les événements de précipitations modérés mais aussi les événements de précipitations extrêmes avec un risque accru d'inondations associées à de tels événements.

Changement, en moyenne annuelle, du nombre de jours sans pluie et de l'intensité des précipitations quotidiennes

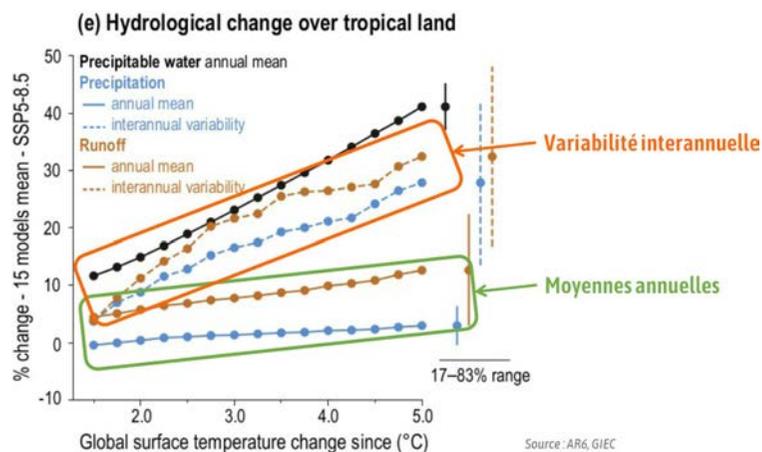


Source : AR6, GIEC

S'agissant du nombre de jours sans pluie (figure ci-dessus), la réponse est plus hétérogène spatialement, plus variable d'une région à l'autre. On constate à la fois des zones en bleu où le nombre de jours pluvieux augmente, et des zones en rouge où c'est le nombre de jours secs qui augmente, notamment sur l'Amazonie et dans les régions semi-arides que j'ai évoquées et qui sont déjà des régions relativement vulnérables au manque d'eau. On voit donc que le nombre d'évènements pluvieux va diminuer. On risque alors d'avoir une variabilité de plus en plus forte de la pluviométrie annuelle qui va dépendre d'un nombre d'évènements de plus en plus faible.

Cet accroissement de la variabilité du cycle de l'eau d'une année à l'autre est particulièrement flagrant lorsqu'on s'intéresse aux régions tropicales. Sur cette figure est représentée l'évolution de la moyenne des précipitations, en bleu, et du ruissellement, en ocre, en fonction du niveau de réchauffement global atteint dans les projections du XXI^e siècle, indépendamment du scénario envisagé.

Changement des valeurs estivales des précipitations et de leur variabilité interannuelle sous les tropiques



On constate que la moyenne du ruissellement et que la moyenne des précipitations augmentent en fonction du niveau de réchauffement. On constate en pointillés que l'évolution de la variabilité interannuelle de ces variables, les précipitations mais encore plus le ruissellement, augmente beaucoup plus que l'évolution des moyennes. On va donc avoir des ressources en eau beaucoup plus volatiles dans des régions fortement dépendantes de la ressource, notamment pour leur agriculture.

La conséquence est que nos politiques d'adaptation doivent vraiment être très prudentes, ne pas se baser uniquement sur l'évolution des moyennes, mais aussi sur l'évolution de la variabilité au cours du temps et également d'un modèle à l'autre.

4. Incertitudes

Nous avons sur cette figure, pour un niveau maximum de réchauffement de 5°C, des barres d'erreur qui montrent qu'au-delà de la réponse médiane donnée par l'ensemble des modèles, certains modèles montrent des évolutions encore plus spectaculaires de la variabilité ou de l'augmentation du ruissellement et des précipitations sous les Tropiques, avec des risques d'inondation, mais aussi, en raison de la variabilité croissante, de sécheresse qui pourrait être accrue par rapport à la réponse moyenne souvent commentée dans les rapports du GIEC.

Il est donc très important d'avoir des stratégies d'adaptation qui soient basées sur autant de modèles que possible et non seulement un modèle illustratif, sur l'ensemble des scénarios plausibles en termes

d'émissions des gaz à effet de serre, et qui tiennent compte des évolutions moyennes mais aussi de la variabilité temporelle des ressources et des flux d'eau.

Changement climatique et biodiversité



Anne LARIGAUDERIE
Secrétaire exécutive de l'IPBES

Il y a aujourd'hui deux grandes crises environnementales qui compromettent sérieusement l'avenir de l'humanité : le changement climatique et la perte du monde vivant ou crise de la biodiversité.

1. Remise en contexte historique

Deux conventions, l'une liée à la biodiversité et l'autre au changement climatique, ont vu le jour ensemble au Sommet de la Terre à Rio en 1992. Le GIEC, ou Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat, existait déjà depuis cinq ans. La Convention Climat a donc pu bénéficier dès son lancement des travaux du GIEC, de ses rapports scientifiques sur l'état des connaissances sur le climat. De son côté, la Convention sur la biodiversité a dû attendre une vingtaine d'années pour qu'enfin une plateforme similaire, l'IPBES, voie le jour en 2012. Il s'agit de la plateforme intergouvernementale sur la biodiversité et les services écosystémiques.

Les rapports de l'IPBES



L'IPBES a été très active au cours de ces dix dernières années et a établi un solide socle de connaissances en appui à la prise de décisions, avec une dizaine de rapports produits. En particulier, en 2019, a été publié le rapport phare de l'IPBES : la première évaluation mondiale de la biodiversité et des services écosystémiques.

Le fait que ces deux conventions aient été séparées a conduit à aborder ces deux crises environnementales également de manière séparée. Ceci est problématique. De son côté, la communauté scientifique a travaillé ensemble sur ces deux sujets. Elle ne connaît pas de division entre le changement climatique et la biodiversité. Le GIEC et l'IPBES ont même entamé une collaboration en 2021 avec la production d'un rapport d'atelier qui étudie les liens très étroits entre la biodiversité et le changement climatique, liens qui conduisent à recommander de manière très importante qu'il y ait davantage de

convergences entre les travaux des deux conventions sur le climat et sur la biodiversité. Trois constats sont faits.

2. Le premier constat

Le premier point, qui est sans doute le plus connu, est que le changement climatique a déjà un impact qui est très bien documenté sur la biodiversité. Le changement climatique deviendra la cause principale de perte de biodiversité au cours de ce siècle. Le changement climatique peut agir de bien des manières sur la biodiversité au travers de la température, des événements extrêmes, du changement de régime des précipitations, du changement de fréquence et de l'intensité des feux. Ces effets du changement climatique sont documentés dans tous les écosystèmes, à la fois chez les plantes et chez les animaux.

Les espèces peuvent migrer, quand elles le peuvent. C'est le cas, par exemple, de la chenille processionnaire urticante qui progresse vers le nord, en France, assez rapidement, causant entre autres des problèmes de santé publique. C'est également le cas des espèces marines qui progressent également vers les pôles pour essayer toujours d'échapper aux conditions climatiques extrêmes. Quand les espèces n'ont pas la capacité de pouvoir migrer, alors on assiste à des extinctions qui peuvent être locales ou encore globales. On le voit par exemple avec l'effondrement des récifs coralliens, très bien connu et décrit.

3. Le deuxième constat

Il existe des solutions qui peuvent permettre à la fois de résoudre le problème du changement climatique et celui de la crise de la biodiversité. Il s'agit des solutions qui sont fondées sur la nature.

On sait qu'actuellement les écosystèmes naturels absorbent environ un tiers des émissions annuelles de gaz à effet de serre. Tout ce qui va permettre de protéger, de restaurer, d'utiliser de manière plus durable les forêts, les écosystèmes naturels permet non seulement de protéger la forêt, mais également, en diminuant la déforestation, de réduire les émissions de gaz à effet de serre et donc d'atténuer le réchauffement.

Aussi, le volet concernant l'agriculture et les systèmes alimentaires est également important dans le contexte des solutions fondées sur la nature, puisque la production d'aliments contribue à environ un tiers des émissions annuelles de gaz à effet de serre. Tout ce qui va permettre de mieux se diriger vers une transformation fondamentale de l'agriculture vers l'agroécologie avec en particulier l'utilisation de moins d'engrais, et également moins de pesticides, tout ceci va permettre de protéger la biodiversité, mais va également permettre d'accroître la capacité de ces écosystèmes agricoles à stocker du carbone, à la fois dans les sols et dans les végétations et donc d'atténuer le changement climatique et puis de réduire les émissions de gaz à effet de serre, en particulier en diminuant l'apport d'engrais. L'agriculture est la cause principale de la perte de biodiversité. Sa transformation est vraiment au cœur de cette conversation concernant à la fois les solutions pour le changement climatique et pour la perte de biodiversité.

4. Le troisième constat

Certaines mesures d'atténuation et d'adaptation au climat, discutées en particulier dans le contexte de la Convention sur le changement climatique, peuvent avoir des effets négatifs sur la biodiversité et les services écosystémiques.

On peut par exemple penser au déploiement à grande échelle de cultures de biocarburants comme le maïs, le soja ou encore la canne à sucre pour éviter l'utilisation des combustibles fossiles. Or, actuellement, on assiste à une destruction des espaces naturels et également à un remplacement des cultures vivrières pour l'alimentation par des cultures pour la production de biocarburants et donc à une menace importante des écosystèmes naturels et de la sécurité alimentaire pour la production de biocarburants.

Un autre exemple est celui de la plantation d'arbres à grande échelle dont on a tous entendu parler. Quand on prend l'avion, la compagnie aérienne va planter des arbres. L'idée de compenser les effets du changement climatique est très importante. Cependant, cette plantation doit être faite sans détruire les espaces naturels. Elle doit être faite dans le respect des principes de l'agroécologie, en particulier en utilisant des espèces locales pour ne pas avoir des problèmes de pollution ou d'espèces envahissantes comme on commence à le voir. Et évidemment, elle ne doit pas non plus déplacer les populations autochtones de leur territoire comme on commence également à le voir.

5. Conclusion

La perte de biodiversité et le changement climatique sont liés et ils se renforcent mutuellement. Ils ne peuvent être résolus que s'ils sont abordés ensemble. Il existe des solutions qui doivent être promues davantage pour pouvoir y parvenir. Il s'agit des solutions basées sur la nature. Ces solutions devraient être davantage encore considérées, en particulier dans le contexte du travail de la Convention sur le changement climatique.

Changement climatique et activité de feux en France métropolitaine



François PIMONT
Ingénieur de recherche à l'INRAE

1. Éléments favorisant les feux de forêts

Les feux de forêt dépendent de plusieurs facteurs principaux. Pour qu'un feu se propage, il faut déjà du combustible. Le combustible jouant le rôle le plus important est constitué des éléments de végétation les plus fins, comme les aiguilles, les feuilles ou les petits rameaux. Ces éléments fins ont le temps de brûler pendant le passage du feu et contribuent à la propagation du front de flamme. La continuité horizontale de la végétation dans le sous-bois et la continuité verticale entre le sous-bois et les arbres favorisent cette propagation.

La vitesse de propagation dépend évidemment du niveau de sécheresse du combustible.

Si la végétation est très humide, elle ne va même pas s'enflammer. Plus celle-ci est sèche, plus l'inflammation est facile et plus le feu se propage rapidement. Un feu plus rapide est également plus puissant, il présente des flammes plus hautes et dégage davantage d'énergie. Il

est donc plus difficile à maîtriser par les forces de lutte. Ce niveau de sécheresse du combustible dépend des conditions météorologiques qui précèdent le feu.

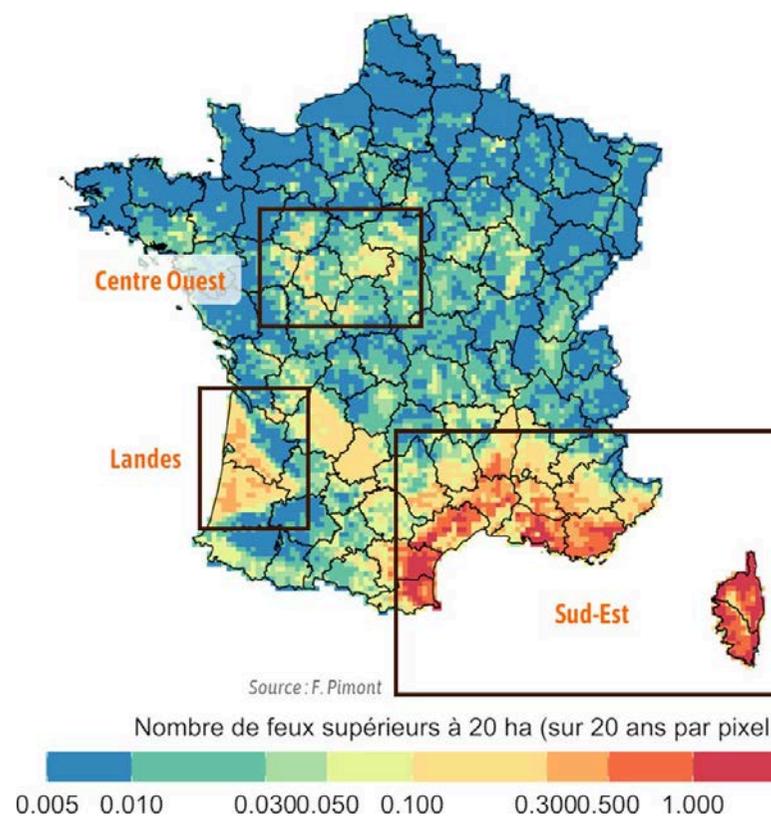
Parmi ces facteurs, on retiendra en premier lieu la sécheresse météorologique, c'est-à-dire qu'un déficit de précipitations prolongé pendant plusieurs semaines va diminuer progressivement la quantité d'eau présente dans les plantes au fur et à mesure que les sols s'assèchent et que les plantes transpirent. On peut aussi compter avec le déficit de vapeur d'eau dans l'air le jour du passage du feu. En effet, un air sec peut assécher en quelques heures la végétation morte, comme les herbes sèches ou les tapis d'aiguilles. Cette sécheresse de la végétation morte va jouer un rôle clé vis-à-vis des départs de feu mais aussi de la propagation. L'autre facteur météorologique très important est le vent. Le vent va accroître la vitesse de propagation des feux par convection, c'est-à-dire qu'il va transporter les gaz chauds produits par le feu vers la végétation non brûlée. Le vent accroît aussi la vitesse de propagation à cause du rayonnement des flammes. Plus le vent est fort, plus celles-ci sont inclinées vers la végétation non brûlée, ce qui favorise son inflammation.

Un autre facteur déterminant est le nombre de départs de feu. En France, l'éclosion est principalement liée aux activités humaines, que ce soit par imprudence du grand public ou des professionnels, et parfois aussi par malveillance. L'éclosion naturelle liée à la foudre est largement minoritaire en France. Il faut cependant retenir qu'elle joue un rôle clé dans d'autres régions du monde.

En France, le rôle de l'homme ne se limite pas aux éclosions puisque les actions de prévention et de lutte permettent également de réduire

drastiquement le développement des feux. Par exemple, on estime que les progrès de la prévention et de la lutte ont permis de diviser par 4 l'activité des feux entre les années 1980 et les années 2010. Ces améliorations découlent principalement de la réduction du nombre de feux supérieurs à 1 ha du fait des efforts de prévention et de l'amélioration de l'attaque initiale sur feu naissant.

Exposition aux feux de forêt en France (2001-2020)



En France, les feux de forêt ont lieu principalement en été dans le quart sud-est de la France et dans le massif landais. Ce sont les

endroits où les conditions météorologiques et la végétation favorisent le développement des feux. Il existe également une zone d'activité des feux dans le centre-ouest et même au-delà, lors de certaines années particulièrement chaudes. Par exemple, en 2022, il y a eu des feux très importants en Bretagne. Certaines zones présentent également des activités de feu importantes en hiver ou au début du printemps, comme en Aquitaine ou dans les zones de montagne.

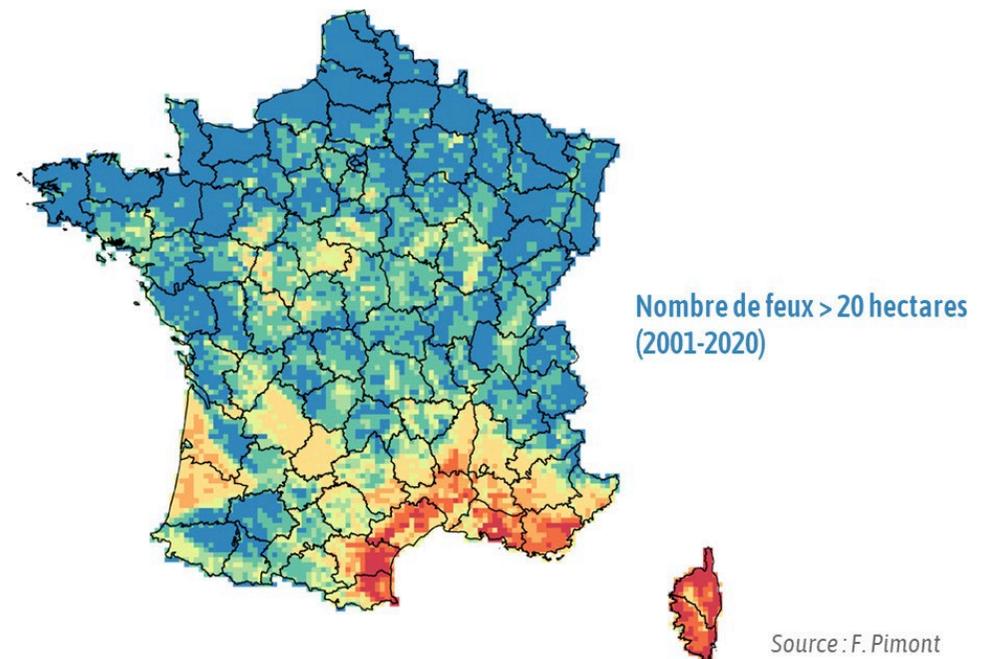
2. Impacts du changement climatique sur l'activité de feux : méthode

Le changement climatique va induire progressivement des changements dans la météorologie observée au quotidien. Ces changements de température, de sécheresse de la végétation et de sécheresse de l'air vont avoir des effets sur les feux et ces effets vont s'amplifier dans le futur. Pour anticiper ces effets, les scientifiques s'appuient sur des travaux de simulation de l'impact du changement climatique en trois phases.

D'abord, il s'agit de simuler la météorologie du futur. Les modèles climatiques permettent de générer des projections des données météorologiques. Elles illustrent ce à quoi pourront ressembler en 2050 ou en 2100 les observations quotidiennes de précipitations, de températures ou de vent en différents points du territoire. Ces projections dépendent, bien sûr, fortement des efforts de réduction d'émissions mis en œuvre par l'humanité à l'échelle globale. Il s'agit des fameux scénarios RCP analysés notamment par les experts du GIEC.

Ensuite, il faut traduire ces données météorologiques futures en danger feu de forêt ou en activité de feu potentielle. Pour cela, on utilise des indices climatiques, comme l'indice forêt météorologique. Celui-ci permet de quantifier l'impact de la météorologie sur le niveau de danger. Il sert, par exemple, à établir la météo des forêts et contribue à l'assistance de Météo France auprès des opérationnels. On peut aussi utiliser des modèles probabilistes permettant d'établir un lien entre, d'un côté les caractéristiques des feux qu'on observe, leur nombre, leur taille, et de l'autre l'ensemble des facteurs cités plus haut, à savoir la météorologie, le combustible et les activités humaines.

Modèle probabiliste d'activité de feux



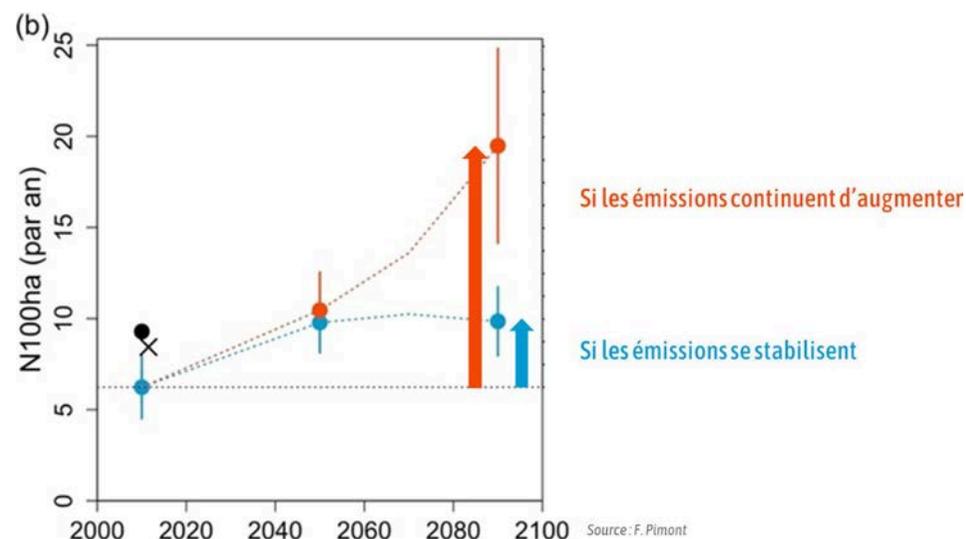
Ces modèles probabilistes sont ajustés sur les observations passées. On peut alors utiliser les simulations du modèle pour présenter les probabilités d'occurrence des feux sous forme de carte, comme on peut le voir ici.

La dernière étape du travail consiste à projeter les activités de feu dans le futur en appliquant ces modèles probabilistes non pas aux conditions météorologiques présentes, mais à celles qu'on anticipe dans le futur selon les différents scénarios. La combinaison de ces trois étapes permet d'évaluer l'impact du changement climatique sur les activités de feu en comparant la situation actuelle avec les projections pour le futur.

3. Impacts du changement climatique sur l'activité de feux : projections

Si on s'intéresse aux grands feux supérieurs à 100 ha dans le quart sud-est de la France, on voit ici (ci-contre) en rouge que leur nombre pourrait passer d'une moyenne de 7 par an sur la période actuelle à près de 20 par an en fin de siècle si nos émissions continuent à augmenter au rythme actuel. Si on se place dans un scénario moins pessimiste, en bleu, l'augmentation est plus modérée, mais tout de même très significative avec un doublement des grands feux. Cette projection fait l'hypothèse qu'on arrive à stabiliser les émissions globales à un niveau faible.

[Sud-Est] Projections du nombre de feux > 100 hectares / an

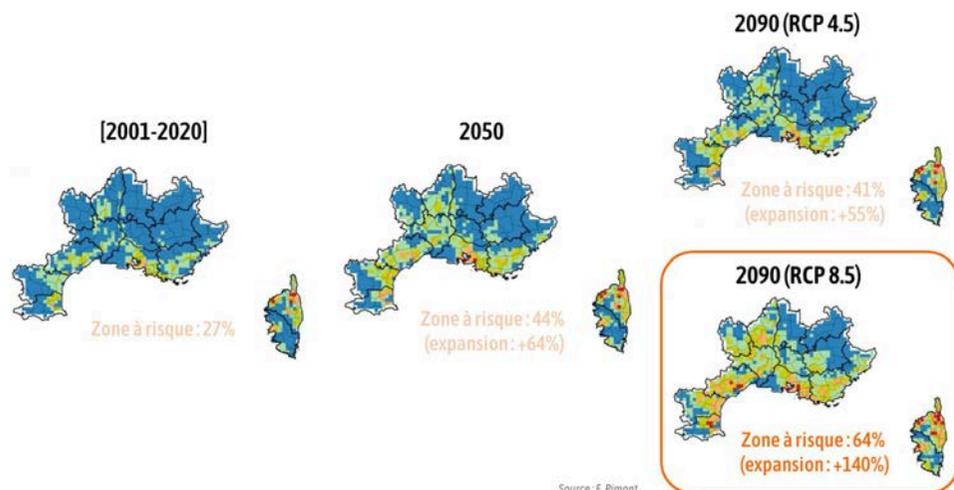


Ces niveaux d'activité peuvent être analysés en relation avec les degrés de réchauffement pour l'ensemble de la planète. Ce sont les fameux plus 2, plus 3 et plus 4 degrés de réchauffement global dont on parle dans les accords internationaux. Dans le cas de la trajectoire pessimiste, on dépassera plus 4 degrés de réchauffement global en fin de siècle alors que le réchauffement se situerait entre plus 2 et plus 3 degrés selon la trajectoire plus optimiste.

Ce type de résultat illustre l'importance de l'enjeu d'une réduction massive des émissions au niveau global pour limiter le réchauffement. En effet, chaque degré de réchauffement supplémentaire aura un impact très concret sur la population française, illustré ici par le nombre de grands feux de forêt auquel elle sera confrontée dans le sud-est.

Ces évolutions vont poser des problèmes de nature variée aux populations, mais avant tout aux services chargés de la prévention et de la lutte. Ils vont devoir agir sur des zones plus étendues, c'est ce qu'on appelle l'expansion de la zone à risque.

[Sud-Est] Expansion de la zone à risque

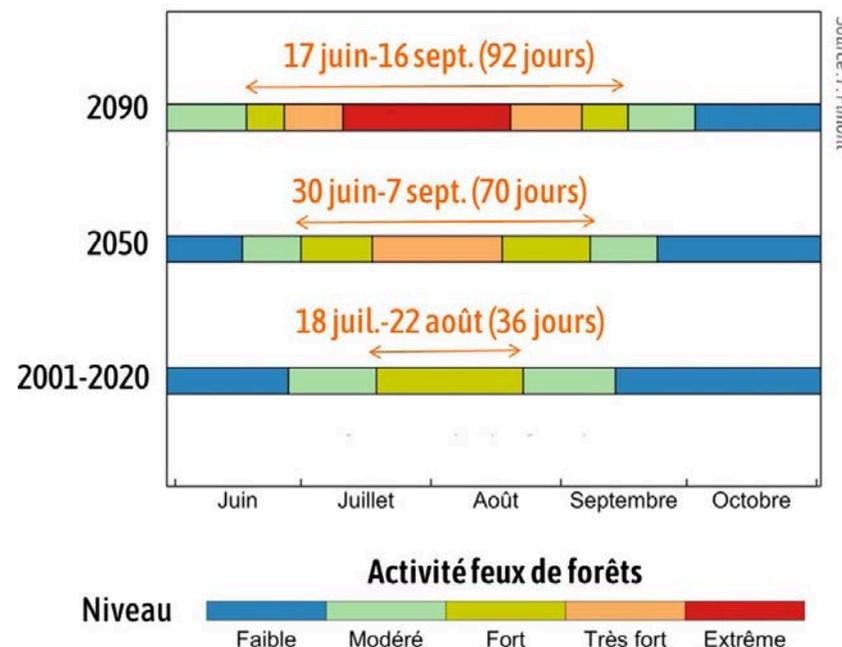


Par exemple, la zone concernée par des activités de feu significatives pourrait passer progressivement d'un peu plus d'un quart de la zone sud-est à presque la moitié en 2050. Elle pourrait ensuite continuer à s'étendre jusqu'à presque deux tiers de la zone en 2090 dans le scénario pessimiste.

Les services vont également devoir faire face à des saisons de feux plus longues avec un démarrage plus précoce et une fin plus tardive. Cet allongement de la saison induira de la fatigue et de l'usure pour les personnels concernés. Aujourd'hui, le cœur de saison de feux dure un peu plus d'un mois aujourd'hui, entre le 18 juillet et le 20

août. Ce cœur de saison pourrait commencer un mois plus tôt et terminer presque un mois plus tard.

[Sud-Est] Allongement de la saison des feux



Enfin, les services de prévention et de lutte vont être confrontés à davantage d'événements concomitants, ce qui va les conduire à disperser leurs moyens. On estime que le changement climatique devrait augmenter le nombre de fois où plus de sept feux dépassant 1 ha se produisent une même journée. Actuellement, ce seuil critique n'est franchi que deux fois par an en moyenne, mais il pourrait grimper jusqu'à 10 fois par an en fin de siècle. Ces configurations vont donc se produire plus souvent, favorisant le risque que les services

opérationnels soient débordés et donc que de très grands feux se produisent.

À l'échelle du territoire national, l'expansion de la zone à risque devrait conduire à un rapprochement progressif des trois zones concernées jusqu'à présent (voir plus haut). Les changements les plus marqués devraient avoir lieu à la périphérie des trois zones.

Dans certains de ces départements périphériques, les feux de plus de 20 ha pourraient augmenter d'un facteur supérieur à 3. Bien sûr, ce type d'étude prospective présente un certain nombre de limites.

On peut citer par exemple l'incertitude liée aux modèles climatiques qui ne prédisent pas tous exactement la même trajectoire. Une autre limite concerne l'extrapolation dans le futur des activités de feu observées par le passé. Ce type d'extrapolation augmente également les incertitudes.

Mais malgré ces limites, ces travaux permettent de quantifier l'ampleur des changements à attendre. Ils rappellent également l'urgence à limiter les émissions pour atteindre la neutralité le plus rapidement possible. Pour finir, précisons que ces résultats sont actuellement utilisés par les services de l'État pour adapter nos politiques publiques.

Sensibilité des calottes polaires au changement climatique

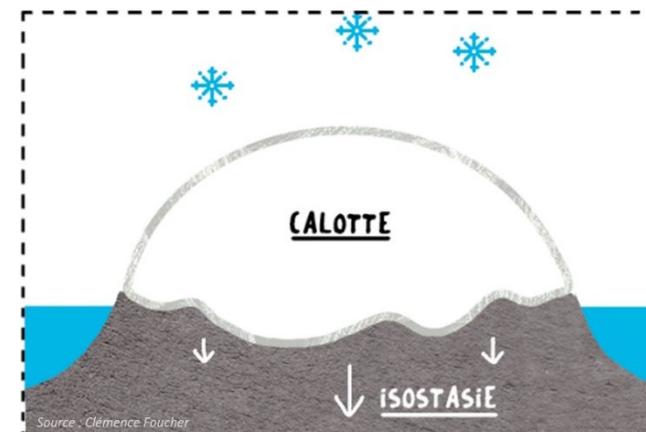


Gaël DURAND

Directeur de recherche au CNRS

1. Formation des calottes polaires

Les calottes polaires se forment lorsque le climat est assez froid pour que les précipitations neigeuses ne fondent pas complètement d'une année sur l'autre et progressivement s'accumulent. Cette neige va se densifier sous le poids des couches successives, se transformer en glace, puis cette glace va s'écouler sous l'effet de la gravité. Des glaciers se forment, coalescent petit à petit, jusqu'à recouvrir l'essentiel du continent d'une couche de glace de l'ordre de 3 km. Sous le poids de cette glace, la croûte terrestre s'enfonce, ce qu'on appelle l'isostasie.



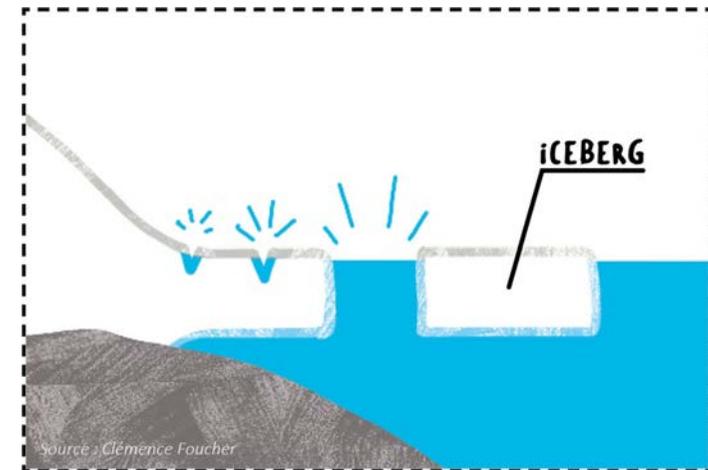
2. Evolution des calottes polaires dans le temps

Cette glace, c'est de l'eau extraite des océans, qui, donc, diminue leur niveau moyen. Aujourd'hui, il ne reste que deux calottes polaires sur Terre : le Groenland, qui stocke 7 m d'équivalent niveau des mers, et l'Antarctique, un peu plus de 60 m. Ce sont les plus grosses réserves d'eau douce de la planète. Mais il y a 20 000 ans, nous étions dans une période glaciaire. Groenland et Antarctique étaient légèrement plus gros, mais surtout, une énorme calotte recouvrait le Canada actuel, la calotte Laurentide, et une autre se situait sur la Scandinavie, la calotte fennoscandienne. En conséquence, le niveau de la mer était alors près de 130 m plus bas qu'actuellement.

3. La perte de masse des calottes

Nous venons de voir le processus par lequel les calottes gagnent de la masse, les précipitations neigeuses, mais évidemment, elles ne croissent pas indéfiniment, il y a des processus de perte de masse. Si, au bord du continent, la température est suffisamment élevée en été, la surface va fondre et cette eau va ruisseler, s'infiltrer parfois jusqu'au socle rocheux et rejoindre l'océan. Éventuellement, la glace peut atteindre l'océan, et les glaciers dits émissaires, qui évacuent la glace de la calotte, peuvent se mettre à flotter et se prolonger sur l'océan le long des fjords. Au front du glacier, la glace va se fracturer et former des icebergs, ce qu'on appelle le vêlage.

Le processus de perte de masse des calottes



4. Calottes polaires et niveau marin

Si on fait la différence entre les processus qui gagnent de la masse et ceux qui en perdent, on fait ce qu'on appelle le bilan de masse. S'il est nul, les termes de perte sont égaux aux termes d'accumulation, la calotte est en équilibre, son volume ne change pas et n'affecte pas le niveau des mers. Si les calottes étaient vraisemblablement proches de l'équilibre lors des derniers siècles, depuis la fin du XXe siècle, elles perdent de plus en plus de masse, et donc contribuent au niveau des mers aujourd'hui de l'ordre de 1,4 mm par an.

Les calottes ne sont pas les seuls contributeurs à l'élévation du niveau des mers, les glaciers de montagne, dans les Alpes, mais surtout l'Alaska, l'Himalaya, les Andes, contribuent à 0,6 mm par an. En se réchauffant, les océans voient leur volume augmenter, ce qu'on appelle l'expansion thermique, et cela élève le niveau des mers de 1,4

mm chaque année. Enfin, le stockage sur le continent dans les lacs, rivières, barrages, contribue à 0,6 mm par an.

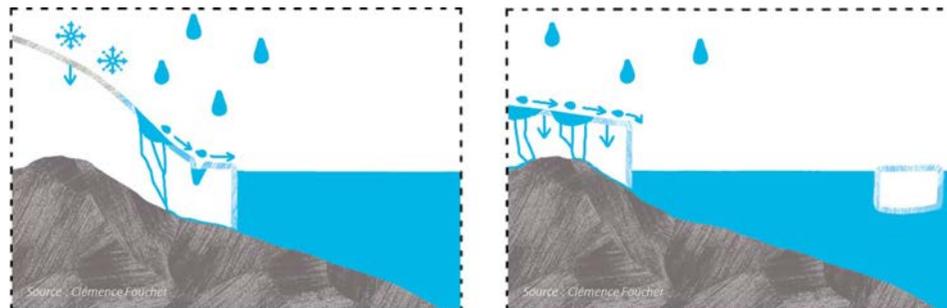
Au total, le niveau de la mer augmente année après année de 4 mm en ce moment, plus de deux fois plus vite qu'au cours du XXe siècle.

5. Le cas du Groenland

La description des processus de perte que j'ai faite précédemment est caractéristique du Groenland, où la fonte à la périphérie de la calotte est très importante. Surtout, l'extension de la fonte et son amplitude ont largement augmenté depuis 30 ans et dominent la perte de masse du Groenland. Aussi, les extensions flottantes de nombreux glaciers émissaires se sont progressivement démantelées, ces glaciers ont accéléré et rejettent plus de glace vers l'océan qu'il y a quelques décennies. Aujourd'hui, le Groenland contribue à 0,9 mm d'élévation du niveau des mers chaque année.

Il est important de noter que si la perte de masse est importante, la surface perd de l'altitude, il y fait alors plus chaud et la fonte est alors d'autant plus importante. C'est ce qu'on appelle une rétroaction positive et il y a un point de bascule. À un moment, la surface de la calotte est trop basse pour que, sur l'année, la neige tombée en surface soit pérenne, il n'y a plus de terme d'accumulation et la calotte est alors irrémédiablement perdue. Pour le Groenland, on estime que ce point de bascule se situe entre plus 1,5 et 2 degrés de réchauffement moyen par rapport à la période préindustrielle. Autrement dit, si le climat continue de se réchauffer et qu'un climat plus chaud se maintient, on pourrait progressivement perdre la calotte du

Groenland. C'est un processus relativement lent, qui prend plusieurs siècles à plusieurs millénaires, et plus la température moyenne sera élevée, plus cette fonte du Groenland sera rapide.



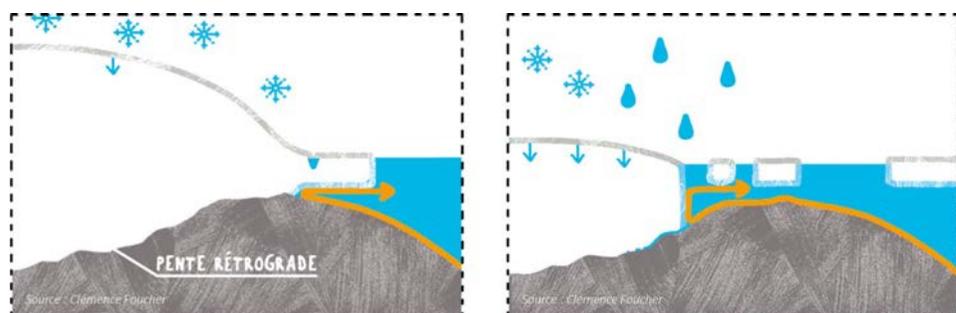
6. Le cas de l'Antarctique

Il y fait nettement plus froid, la fonte en surface est négligeable, alors les langues de glace flottantes se prolongent largement sur l'océan, remplissent des baies et forment des plateformes de glace flottantes. Ces plateformes ont un rôle essentiel car elles limitent l'écoulement des glaciers en amont par un effet d'arc-boutant. Cela a été très clairement illustré lorsqu'en 2002, la plateforme du Larsen B s'est démantelée. Les glaciers qui finissaient dans cette plateforme ont vu leur vitesse augmenter, pour certains jusqu'à multipliée par 8, relarguant d'autant plus de glace vers l'océan. L'intrusion d'eau chaude dans les cavités sous les plateformes, la formation de lacs supraglaciaires due à la fonte de surface viennent fragiliser ces plateformes et accélérer les glaciers amont.

C'est typiquement ce qui est à l'œuvre dans le secteur de la mer d'Amundsen où les glaciers de Pine Island et Thwaites perdent depuis

une trentaine d'années de la masse et aujourd'hui gouvernent largement le bilan de masse négatif de l'Antarctique qui contribue actuellement à 0,5 mm par an à la hausse du niveau des mers.

Mais l'Antarctique a une autre particularité, l'Antarctique de l'Ouest en particulier. Le socle rocheux se trouve sous le niveau de la mer et est de plus en plus profond à l'intérieur du continent. La ligne d'échouage, la limite entre la partie posée de la calotte et les plateformes de glace flottantes, est à proximité de cette pente qu'on qualifie de rétrograde pour les glaciers de Pine Island et Thwaites.

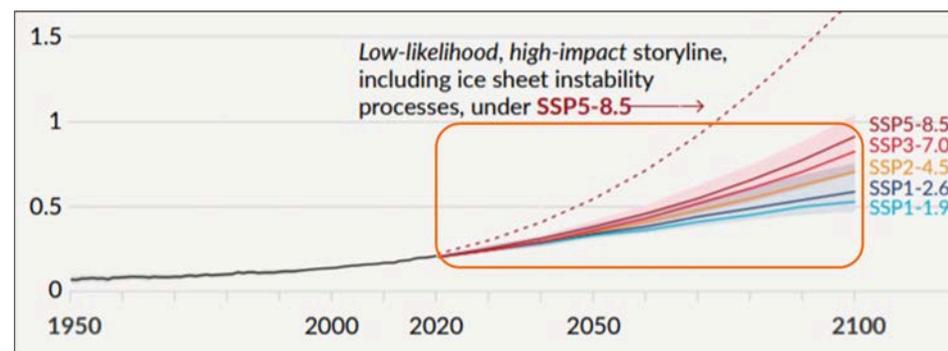


Dans ce cas, en fonction de la capacité des plateformes à retenir ou non l'écoulement amont, on suspecte que ces glaciers puissent être dynamiquement instables. Autrement dit, si la ligne d'échouage s'engage dans cette pente rétrograde, elle ne peut plus se stabiliser et se retire irrévocablement. On parle alors d'instabilité des calottes marines. Là encore, nous avons un point de bascule. Il est, là aussi, estimé autour de plus 1,5, 2 degrés de réchauffement moyen par rapport à la période préindustrielle, mais à cause de processus différents du Groenland. Savoir exactement à quelles conditions ce point de bascule est passé, quel sera le taux de retrait des glaciers une

fois instables, restent des questions ouvertes et un sujet de recherche brûlant.

7. Elévation du niveau marin

L'élévation du niveau marin va se poursuivre quel que soit le scénario considéré



Source : GIEC / AR6

Le niveau des mers va augmenter au cours du prochain siècle et pour les siècles à venir, même si notre trajectoire est environnementalement vertueuse. La question n'est plus de savoir si nous allons voir le niveau des mers s'élever de 2 m, mais quand, d'ici approximativement un siècle ou d'ici à deux millénaires ? Plus le climat se réchauffera, plus cette hausse sera rapide et plus son amplitude sera importante. Une augmentation de plus de 10 m d'ici 2300 ne peut être exclue.

De telles hauteurs ne peuvent être atteintes que pour les projections les plus pessimistes, dans lesquelles le Groenland et l'Antarctique sont lancés très tôt et très rapidement dans les instabilités déjà mentionnées. Alors, des régions entières des calottes disparaissent. On

ne peut pas exclure aujourd'hui que l'Antarctique contribue pour près de 1 m à l'élévation du niveau de la mer d'ici 2100, si l'Antarctique de l'Ouest et le secteur d'Amundsen devenaient très prochainement instables et les glaciers de Thwaites et Pine Island réagissaient très vite. On n'est pas capables d'associer une probabilité à cette possibilité, elle est vraisemblablement faible, c'est un scénario du pire, baptisé "High-Impact Low-Likelihood Storyline".

C'est en tout cas une illustration, peut-être même une invitation, très claire et préoccupante à mettre en œuvre tout ce qui est possible pour atténuer fortement et rapidement notre impact sur le climat, et à travailler à s'adapter aux changements qui ne manqueront pas de venir.

L'océan et le climat



Sabrina Speich

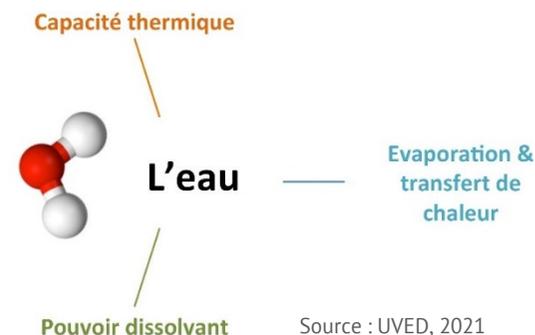
Professeure à l'École normale supérieure - PSL

Je vais vous parler du rôle de l'océan dans notre système climatique. Quand vous pensez au climat, vous pensez au temps qu'il fait, à l'atmosphère. Mais notre système climatique est bien plus complexe que cela. Il est fait de sous-systèmes : l'atmosphère, qui est transparente et dont on ne voit que les nuages, la cryosphère c'est-à-dire la glace, les continents, la biosphère donc la vie sur la terre et dans la mer, et l'océan, qui prend la plus grande surface.

1. Caractéristiques générales de l'océan

L'océan couvre deux tiers de notre planète. C'est une fine pellicule d'eau et le fait qu'il soit fait d'eau est très important car il a une propriété physique particulière. Il a une capacité thermique énorme,

mille fois plus importante que celle de l'atmosphère. Donc il est capable d'absorber des grosses quantités de chaleur. La présence d'eau dans l'atmosphère est aussi due essentiellement à l'océan.



L'eau s'évapore de l'océan, et avec cet échange d'eau, il y a aussi un échange de chaleur qui s'opère par échange de chaleur latente d'évaporation. L'eau a aussi un pouvoir dissolvant énorme. Elle dissout les sels dans l'océan mais aussi les gaz, comme le CO₂ et l'oxygène, ce qui a une conséquence importante sur la vie marine.

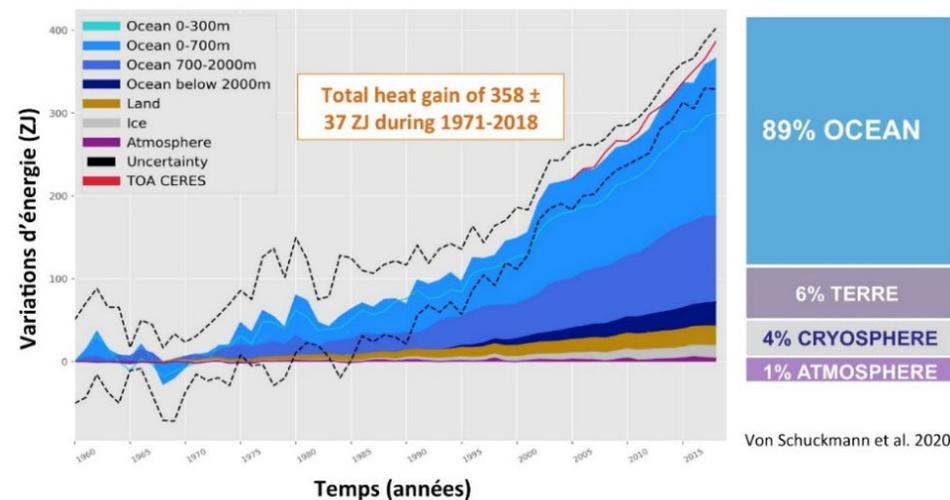
2. Océan et climat

Les caractéristiques de notre système climatique dépendent à bien des égards de la présence de l'océan sur notre planète. Quand on parle du système climatique et de son changement, on pense à l'augmentation de gaz à effet de serre et à la température qui augmente dans l'atmosphère. Le changement climatique est dû à une augmentation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère induite par les activités humaines, et l'augmentation de ces gaz fait que notre système climatique retient plus d'énergie à l'intérieur de notre système, ce qui fait augmenter la température de l'atmosphère et induit, donc, le réchauffement global. Mais la température de l'atmosphère est-elle toute l'histoire de ce réchauffement global ?

Si on parle du changement climatique, on doit vraiment prendre la quantité d'énergie et les changements à l'intérieur de notre système climatique, et si on les mesure, et on peut le faire à partir d'observations des différents sous-systèmes climatiques depuis quelques décennies, on peut voir où est partie cette énergie. Si on regarde les graphiques qui montrent les résultats de ces observations (ci-dessous), on voit que l'atmosphère a absorbé une toute petite partie de cette énergie : 1 %. Pour fondre la glace, uniquement 4 % de cette énergie a été absorbée. Sur les continents, 6 % de cette énergie

est partie, et pratiquement la globalité de l'énergie, 90 %, est partie dans l'océan. Quand on pense au changement d'énergie, au réchauffement, c'est donc surtout l'océan qui se réchauffe. Quelles sont les conséquences de cette augmentation de chaleur dans l'océan ?

Distribution de l'énergie additionnelle dans le système climatique

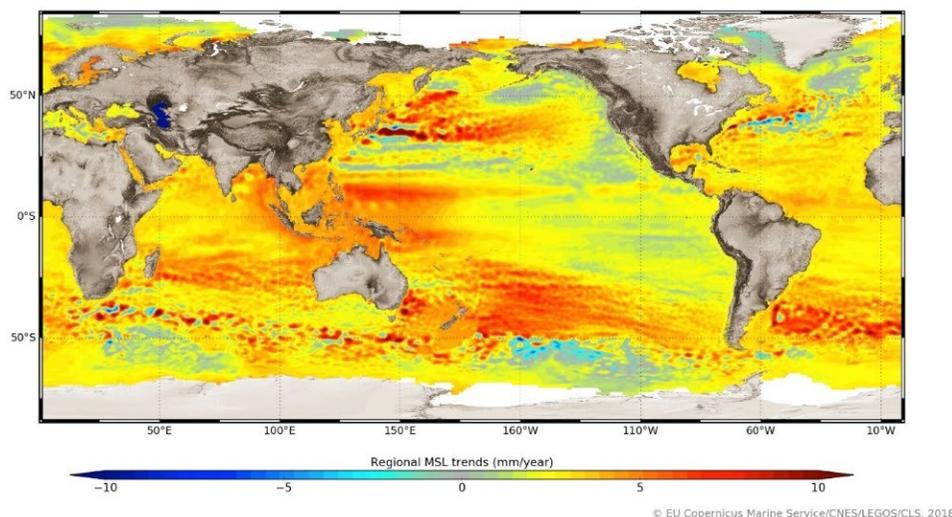


3. Hausse du niveau de la mer

Tout d'abord, si on prend la hausse du niveau de la mer, on se rend compte qu'à partir des mesures spatiales que nous avons depuis 25 ans, ce changement du niveau de la mer ne s'opère pas de manière uniforme. On a sur la figure ci-dessous l'accélération de ce changement. On voit les régions en rouge où le niveau de la mer augmente plus vite que dans les régions plutôt en gris ou en jaune.

Cela est une conséquence de la circulation océanique qui concentre cette augmentation dans des régions particulières.

Évolution du niveau de la mer (en mm/an sur la période 1992-2018)



Mais après, quand vous pensez à la hausse du niveau de la mer, vous pensez à la fonte de la glace continentale. Le volume d'eau qui était stocké dans la glace est parti dans la mer, la mer augmente de volume donc le niveau de la mer monte. Et cela explique 50 % de cette augmentation observée. Cependant, l'océan se réchauffe, et l'eau, quand elle se réchauffe, elle se dilate, donc 30 % du changement du niveau de la mer est dû à cette dilatation thermique de l'océan.

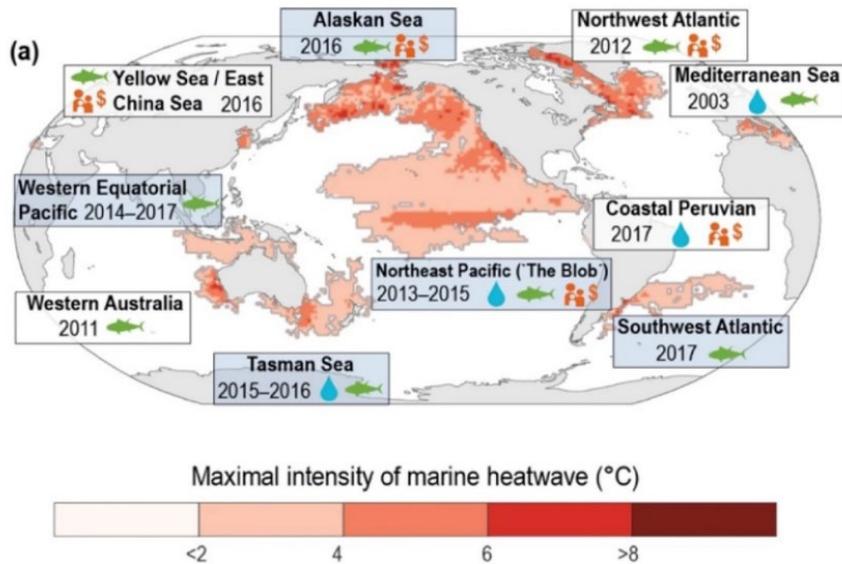
4. Intensification du cycle hydrologique

L'océan qui se réchauffe a une conséquence aussi sur ce qu'on appelle le cycle hydrologique, c'est-à-dire le cycle qui suit la particule d'eau qui s'évapore de l'océan et part dans l'atmosphère, précipite sur les continents et enfin, part dans les rivières et revient à la mer. Un océan plus chaud réchauffe l'atmosphère, et une atmosphère plus chaude peut contenir plus de particules de vapeur d'eau. L'évaporation augmente et le cycle hydrologique augmente. Ainsi augmentent aussi les échanges de chaleur entre l'océan et l'atmosphère. Cette augmentation d'eau précipitante et d'énergie dans l'atmosphère a des conséquences car elle augmente ce que l'on appelle les événements extrêmes. Le changement climatique est un changement de chaleur, mais aussi un changement d'événements extrêmes. Ceux dont vous êtes témoin dans votre vie sont sûrement des vagues de chaleur, des inondations, des coups de vent très forts, mais dans l'océan, nous avons aussi des événements extrêmes, donc des vagues de chaleur.

5. Vagues de chaleur marines

Ce sont des zones de l'océan qui se réchauffent de manière anormale pendant quelques semaines, voire quelques mois, et cela autour de deux, trois, quatre degrés en plus.

Vagues de chaleur marines



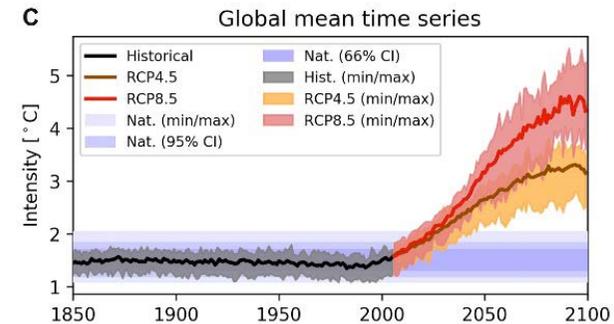
IPCC SROCC 2019

Nous avons observé que cela devient de plus en plus fréquent depuis environ une dizaine d'années. Ce réchauffement anormal de l'océan a des conséquences sur la vie marine car, par exemple, les coraux ne supportent pas de changement de température important et donc, ils meurent. On a le phénomène du blanchissement des coraux tropicaux.

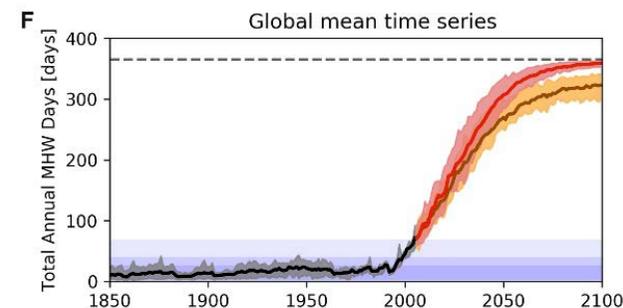
À l'avenir, à cause du réchauffement climatique, la température de l'océan va augmenter ainsi que ces événements extrêmes, en particulier, à la fois en intensité, vous le voyez à droite, et en durée. Et cela, peu importe la projection que l'on prend pour le futur. Donc, les événements extrêmes, en termes de vagues de chaleur, deviennent de plus en plus fréquents et de plus en plus intenses.

6. Inondations côtières

Un autre exemple d'événement extrême est l'occurrence d'inondations côtières. Cela est la conséquence de deux facteurs. Le premier, c'est la hausse du niveau de la mer, et le deuxième, c'est l'intensification des événements météorologiques. Des événements météorologiques plus intenses, plus fréquents, le niveau de la mer plus élevé font que ces inondations augmenteront en intensité, et surtout en fréquence. Dans cette figure (ci-dessous), je vous montre les projections futures à la moitié de notre siècle, donc vers 2050, et à la fin de ce siècle, de ces inondations. On voit que leur fréquence augmente déjà à la moitié de ce siècle de manière très importante.



Intensité

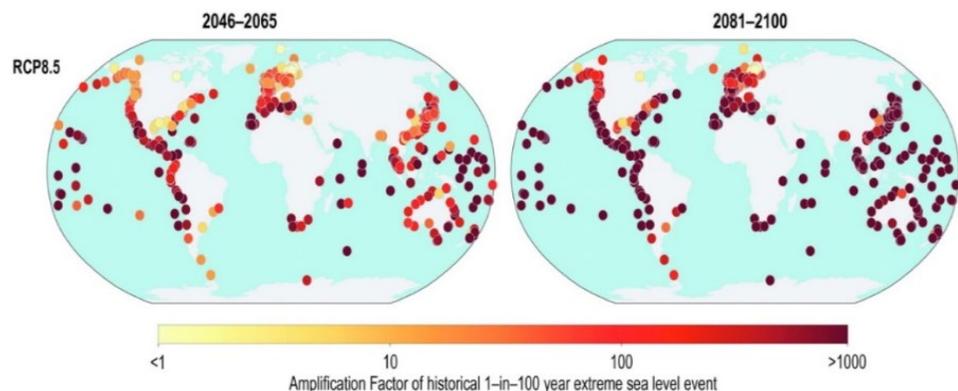


Durée

Oliver et al., 2019

Voici les régions par rapport à aujourd'hui. En couleur rouge, c'est 100 fois plus fréquent, et en rouge très foncé, c'est 1 000 fois plus important.

Projections futures de l'occurrence d'inondations côtières



Source : GIEC, 2019

Conclusion

Ces résultats ont de fortes conséquences sur la gestion des régions côtières, des infrastructures et de la présence humaine le long des côtes, car rendons-nous compte que, déjà aujourd'hui, nous observons des érosions très fortes, des inondations, qui ne feront qu'empirer avec le temps. Il faudra vraiment prendre des décisions pour s'adapter à ces changements.

Biodiversité marine et changement climatique



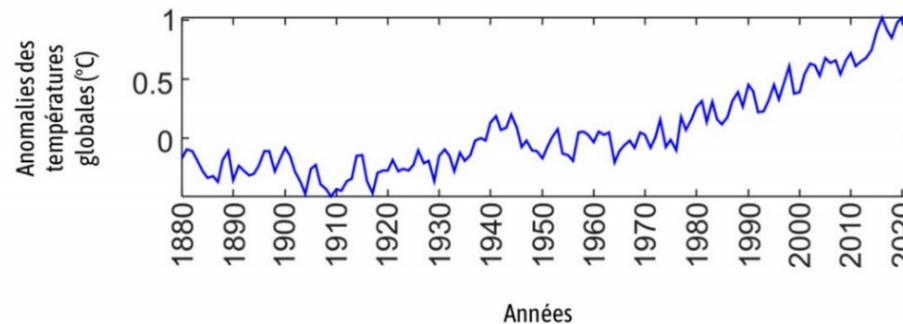
Grégory BEAUGRAND
Directeur de recherche au CNRS

C'est maintenant un fait établi, la température de notre planète augmente. Cette augmentation des températures est liée à l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, elle-même liée aux activités humaines.

1. Réchauffement climatique

Ce graphique vous montre les anomalies de température globale depuis 1880 jusqu'à 2022.

Changements à long terme des anomalies de température (1880-2022)



Source : d'après GIEC, 2021

Nous pouvons voir une augmentation des températures en deux phases : une première phase (1910-1945) et une deuxième phase (de 1965 jusqu'à nos jours). On peut voir également une période de quasi-stagnation des températures, appelée hiatus, au début des années 2000. Mais nous voyons également en 2014-2015 une forte accélération du réchauffement climatique suite à un évènement El Niño majeur. Actuellement, on assiste à une accélération du réchauffement avec une augmentation de 0,23 degré Celsius par décennie.

La température de notre planète a augmenté de 1,1°C par rapport à la période de référence 1850-1900. Cette augmentation de 1°C peut paraître faible, mais elle masque des disparités régionales importantes, puisque dans certaines régions des hautes latitudes, l'augmentation de température peut parfois dépasser 3°C. L'océan a absorbé 93,4 % du réchauffement, suivi de l'atmosphère, des continents et de la cryosphère, c'est-à-dire de la glace sous toutes ses formes, y compris le pergélisol, c'est-à-dire un sol gelé en permanence.

2. La biodiversité marine

Comment va réagir la biodiversité marine face au dérèglement climatique ? La biodiversité est l'ensemble des formes vivantes sur notre planète. Elle s'apprécie à différents niveaux organisationnels, par exemple les gènes, les espèces, les écosystèmes. La biodiversité marine se situe entre 194 000 et 250 000 espèces décrites. Il y a de fortes incertitudes par rapport à ce nombre d'espèces : nous pourrions avoir entre 500 000 et 2,2 millions d'espèces. Nous ne connaissons donc que 9 % des espèces vivant dans nos océans. Il faut aussi noter

que pour ces espèces déjà décrites, on connaît peu de choses sur leur biogéographie, leur rythme de reproduction et leur physiologie.

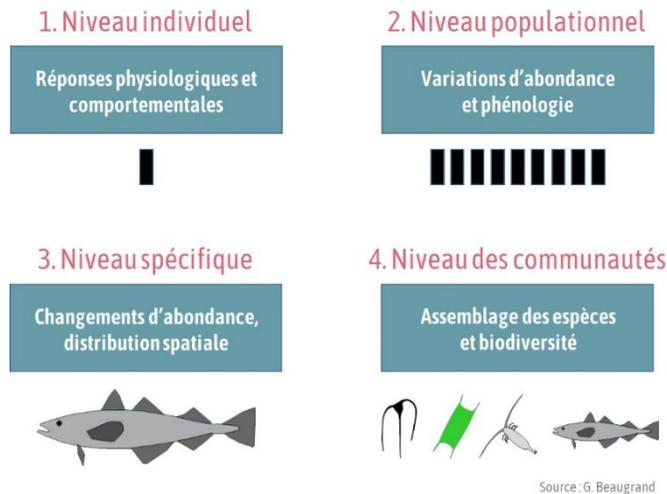
Avec un tel niveau d'inconnaissance, comment pouvons-nous alors étudier globalement la réponse de la biodiversité marine face au dérèglement climatique ? Une première possibilité est d'étudier des groupes taxonomiques clés, bien connus, dans des régions océaniques bien échantillonnées et essayer d'extrapoler à l'ensemble des océans et à l'ensemble des groupes taxonomiques. C'est la démarche inductive. Ici, une autre démarche est privilégiée : c'est une démarche basée sur la théorie biologique et la modélisation. Il s'agit de la théorie METAL pour "Macroecological Theory on the Arrangement of Life".

2. Présentation de la théorie METAL

L'objectif de la théorie METAL est de connecter ensemble un grand nombre de patrons de variabilité et d'évènements observés dans la nature. Cette théorie essaie de connecter ensemble des processus observés en écologie comportementale, en biogéographie, en biologie du changement climatique et en macroécologie. Elle est utilisée aux niveaux individuel, populationnel, spécifique, et aussi celui des communautés.

La brique macroscopique élémentaire de la théorie METAL est le concept de niche écologique d'Hutchinson. La niche écologique est l'ensemble des conditions environnementales qui permettent à une espèce de croître, se maintenir et se reproduire. Cette niche écologique nous permet d'intégrer processus moléculaires, physiologiques, biologiques et comportementaux, mais elle nous

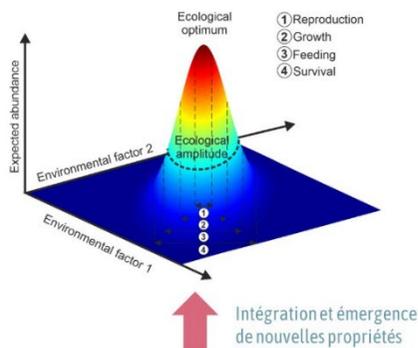
permet aussi d'intégrer l'émergence de propriétés nouvelles à chaque niveau organisationnel supérieur.



La théorie METAL

C'est ainsi que la niche est considérée dans le cadre de la théorie METAL comme une propriété émergente qui permet de synthétiser les besoins environnementaux des espèces en évitant la mise en équation de processus infraspécifiques et infra-individuels.

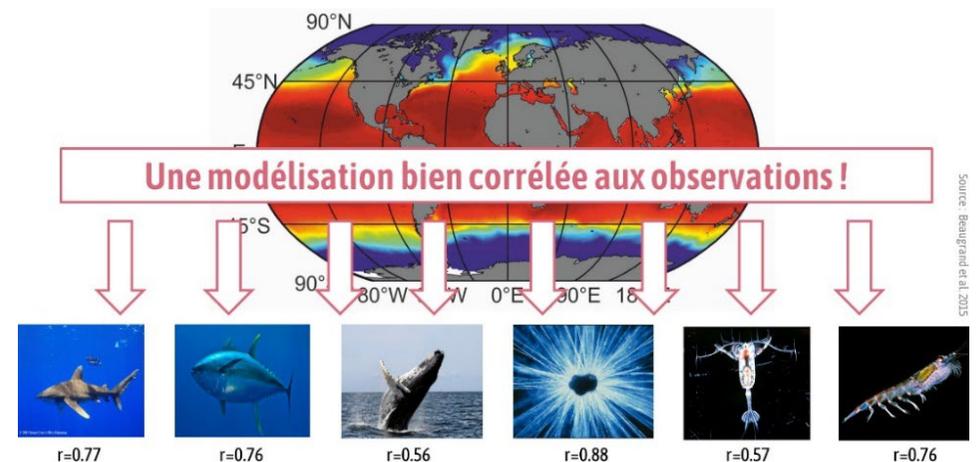
La niche écologique, brique élémentaire



Nous allons ainsi créer des espèces caractérisées chacune par des propriétés biologiques uniques. On va attribuer à chacune de ces espèces virtuelles une niche écologique donnée. Puis en fonction des conditions environnementales de l'océan, certaines espèces vont pouvoir s'établir dans certaines régions de l'océan et se rassembler en communautés. On va pouvoir, de cette façon, reconstituer progressivement la biodiversité de l'océan.

3. Validation de la théorie METAL

Application à la biodiversité de surface de l'océan



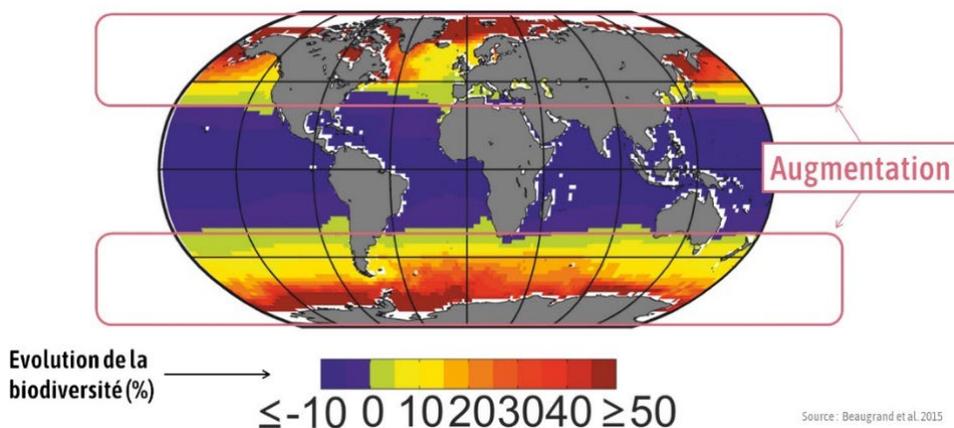
Cette carte vous montre la biodiversité des régions superficielles océaniques. Vous pouvez voir en bleu de faibles valeurs de biodiversité et en rouge de plus fortes valeurs de biodiversité avec un pic de biodiversité au niveau des tropiques. En sciences, les prédictions de nos modèles doivent être testées par les observations. Nous avons testé cette prédiction sur différents groupes taxonomiques,

tels que les foraminifères, les copépodes, les euphausiacés, les poissons cartilagineux, les poissons osseux et les mammifères marins, les cétacés. On obtient de très bonnes relations entre les prédictions et les observations. On a parfois des variations dans les corrélations, mais la plupart du temps, ces corrélations sont significatives.

5. La biodiversité à +2°C

Nous pouvons essayer de voir comment la biodiversité va réagir par rapport à une augmentation des températures. Ici, nous provoquons dans le modèle une augmentation uniforme des températures de 2 degrés Celsius.

Dans le cas d'un réchauffement de 2°C



Ce que vous pouvez voir, c'est que, suite à cette augmentation de 2°C des températures, on assiste à une diminution de la biodiversité dans les régions chaudes de l'océan, c'est-à-dire les régions en bleu sur la

carte. Dans les régions extratropicales, à l'inverse, on note une forte augmentation de la biodiversité. Ça peut paraître surprenant, mais une augmentation de la biodiversité ne veut pas forcément dire une augmentation en termes de services écosystémiques. Cela veut simplement dire une réorganisation dans la structure et le fonctionnement des écosystèmes.

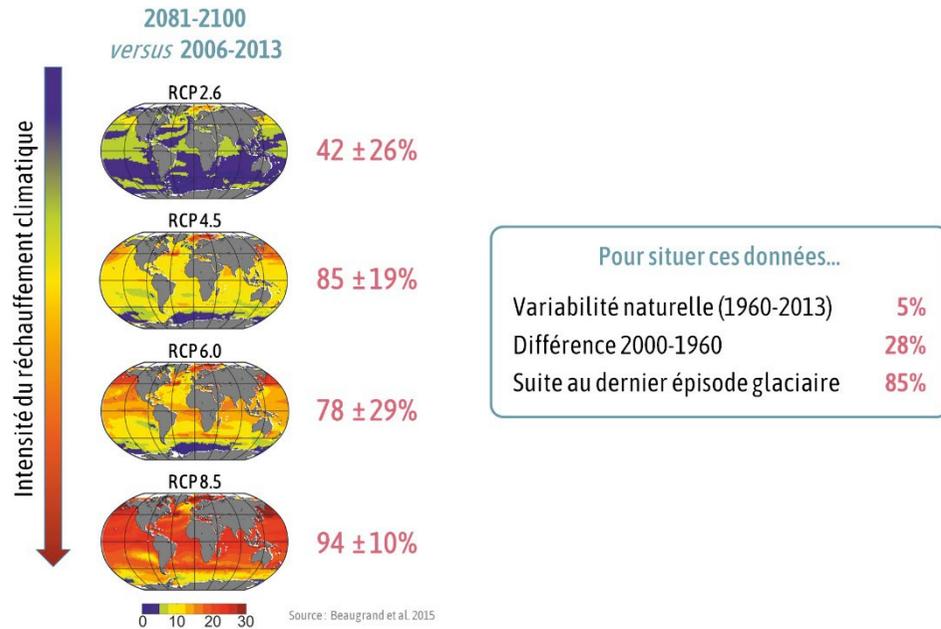
En mer du Nord, effectivement, on peut noter actuellement une augmentation de la biodiversité. Cette augmentation est particulièrement importante à la fin des années 1980 suite à une augmentation assez prononcée des températures. On peut voir également que cette augmentation observée est très bien reconstituée par le modèle METAL.

6. La biodiversité marine en 2100

On peut essayer d'observer les changements de biodiversité d'ici la fin du siècle. Un tel travail a été réalisé en couplant le modèle METAL avec des modèles de circulation générale océan-atmosphère pour quatre intensités de réchauffement climatique, depuis le scénario RCP2.6 jusqu'au scénario RCP8.5.

On constate que lorsque les températures restent en deçà de 2°C, 42 % de la superficie totale des océans va subir des modifications substantielles de la biodiversité. Par contre, lorsque le scénario de réchauffement climatique est très important, 94 % de la superficie totale de l'océan subit des modifications substantielles de biodiversité.

Projections climatiques et changements attendus de biodiversité



Ces changements sont relativement forts lorsqu'on les compare à la variabilité naturelle où on a 5 % de changement de biodiversité. Aussi, lorsqu'on regarde les différences de biodiversité entre les années 2000 et 1960, on s'aperçoit qu'on a déjà 28 % de la superficie totale des océans qui a subi des modifications substantielles de biodiversité. Enfin, pour donner une perspective plus large à ces changements, on a examiné les changements qui peuvent survenir entre une période glaciaire et une période interglaciaire. Ces changements de biodiversité sont de l'ordre de 85 %. Seulement, ces changements ont lieu sur une période couvrant 5 à 6 000 ans, ce qui est bien différent des changements que nous pourrions avoir pour la fin du siècle.

7. Conclusion

La biodiversité marine est très sensible aux fluctuations de températures. Dans les années et les décennies qui viennent, on peut s'attendre à une forte augmentation des changements de biodiversité avec des surprises en termes de rapidité et d'intensité. Ces changements de biodiversité, qu'ils soient positifs ou négatifs, vont avoir des conséquences majeures sur les écosystèmes. Il va y avoir des réorganisations en termes de structure, mais aussi en termes de fonctionnement et de services écosystémiques. Or je rappelle que les services écosystémiques sont évalués à 21 trillions d'euros par an pour les écosystèmes marins.

Ces changements de biodiversité ne sont pas une fatalité. On peut les atténuer en diminuant les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère : chaque demi-degré compte, chaque année compte, chaque mesure compte.

Objectifs d'apprentissage

- ▶ Appréhender les effets actuels du changement climatique et les risques dans des domaines clés comme la santé et l'agriculture
- ▶ Avoir une vision de la vulnérabilité des sociétés à différentes échelles spatiales



Ressources vidéo

Vidéos sur le portail UVED
<https://me-qr.com/l/climat2-s3>

Partie 3. Vulnérabilité des sociétés humaines au changement climatique

Changement climatique et santé humaine

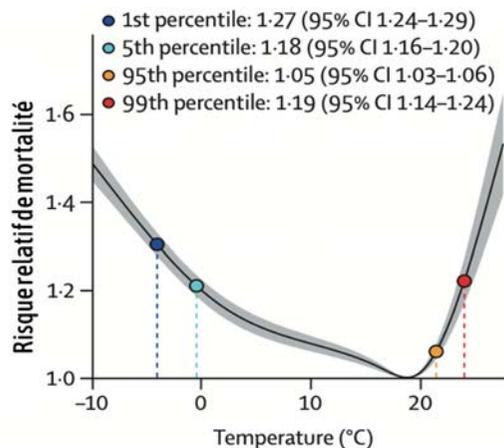
Rémy Slama

Directeur de recherche à l'INSERM



1. Changement climatique, température, et santé

Le changement climatique a de multiples manifestations environnementales dont certaines peuvent influencer notre santé. Le paramètre le mieux connu est la température, qui influence notamment la mortalité avec une courbe schématiquement en U. Elle nous indique un optimal de température, autour de 18, 20, 22°C pour lequel la mortalité est la plus faible. La mortalité augmente à la fois quand la température diminue vers les valeurs plus faibles et quand elle croît vers les températures les plus élevées.



Source: Martinez-Solanas, Lancet Plan Health, 2021

Relation à court terme
entre la température et
la mortalité quotidienne

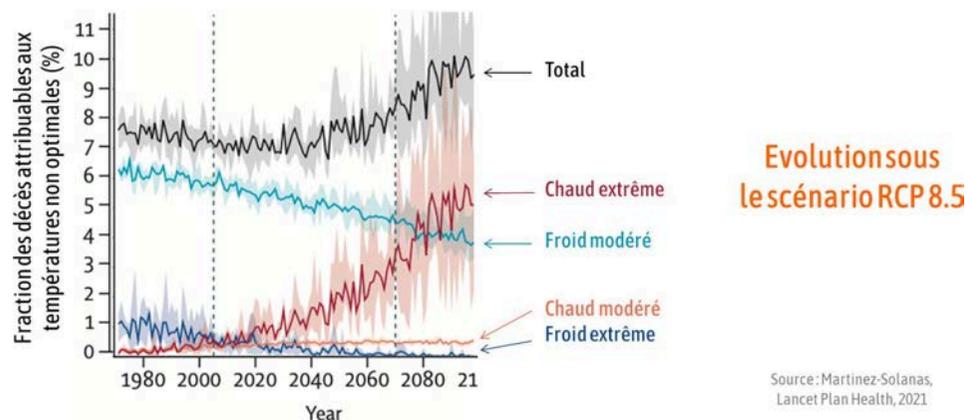
Ce schéma montre aussi que ce n'est pas seulement quand on est dans les températures extrêmes, très chaudes, au-delà de 35°C ou très froides, au-delà de -10°C, que la mortalité croît. Des températures qui s'écartent légèrement de 20°C sont associées à une augmentation certes faible, mais réelle de la mortalité à l'échelle des populations.

Le changement climatique va entraîner une modification de la distribution des températures. D'ores et déjà, la température en Europe a crû de 2 à 3°C sur le sol européen par rapport à l'ère préindustrielle. Cela peut sembler relativement faible. Quand il fait 20°C et que le lendemain, il fait 23°C, on n'a pas de raison de se plaindre.

Mais il faut réaliser que quand la moyenne est décalée de 2 à 3°C, le nombre de jours avec une température extrême, au-delà de 30 ou 35°C, est multiplié de façon très importante. On s'attend ainsi à une multiplication par 20, 30, 40 du nombre de jours avec des températures extrêmes au milieu du XXI^e siècle, en Europe, par rapport à l'ère préindustrielle.

Pour prédire l'influence du changement climatique sur la mortalité qui passe par la température, il faut prendre en compte tous ces éléments. C'est ce qui a été fait dans un travail qui a été publié en 2021. Il nous dit d'abord qu'aujourd'hui, de l'ordre de 7 à 8 % des décès sont dus aux températures extrêmes en Europe. Vous voyez, sur la figure ci-dessous, que la majorité de cet impact, aujourd'hui, est un effet des températures froides. Ça correspond à la courbe en bleu, alors que les températures chaudes ont une influence sur la mortalité qui est relativement faible, de l'ordre de 1 % des décès.

Changements prévus dans la mortalité attribuable aux températures extrêmes en Europe



Maintenant, si on se projette dans le futur, sous l'hypothèse où on continue à émettre des gaz à effet de serre comme par le passé, ce qui correspond au scénario RCP 8.5, on voit que la mortalité due aux températures chaudes, dont la fréquence va augmenter fortement, croît de façon très importante (courbe en rouge), alors que la mortalité due aux températures froides, dont la fréquence va légèrement diminuer, va un peu diminuer. Globalement, la mortalité totale augmente assez fortement (courbe en noir).

Si les sociétés choisissent de réagir fortement et de se plier à l'Accord de Paris en limitant les émissions (scénario RCP 2.6), la situation future devrait conduire à une légère diminution de la mortalité attribuable aux températures froides, à une légère augmentation de la mortalité due aux températures chaudes et un bilan global sur la mortalité qui correspond à une stagnation, voire une légère diminution de la mortalité en Europe, avec des contrastes entre les pays.

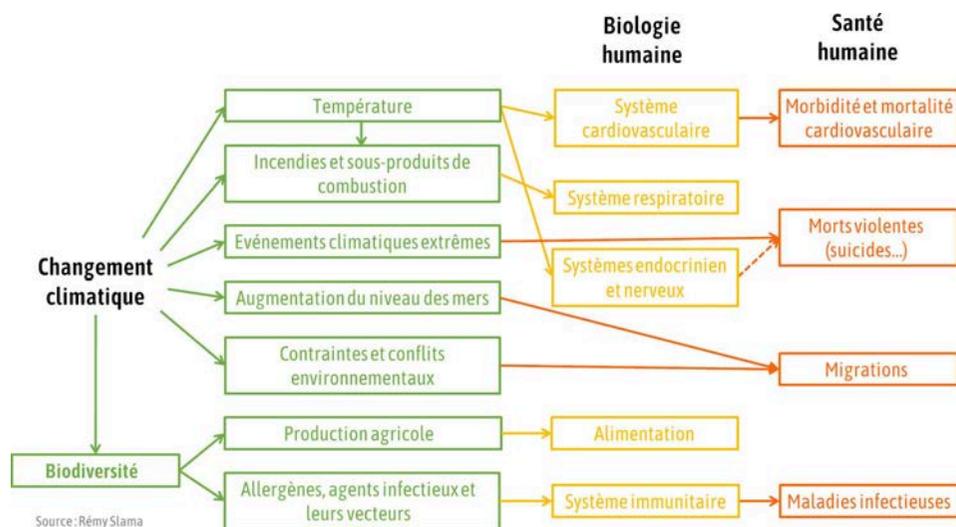
2. Autres impacts du changement climatique sur la santé

Cet impact du changement climatique sur la santé va aussi se manifester par :

- la fréquence des incendies, qui sont associés à la mortalité, et à une émission accrue de particules fines très nocives pour la santé,
- l'augmentation des événements climatiques extrêmes comme les inondations, les sécheresses, les tempêtes qui, elles aussi, influencent notre bien-être et notre santé,
- à une augmentation du niveau des mers et à d'autres contraintes environnementales qui peuvent augmenter les conflits environnementaux,
- une altération de la qualité et de la quantité de la production agricole,
- une variation de la fréquence de certains allergènes et de maladies infectieuses. Les facteurs responsables de ces maladies infectieuses sont, dans la plupart des cas, sensibles au climat, notamment à la température, aux précipitations. C'est le cas de deux tiers des agents infectieux qui sévissent en Europe.

Par exemple, les pathogènes qui sont transmis par les moustiques vont être plus ou moins capables de persister et de se répandre si les températures deviennent plus chaudes et si on a en permanence des mares où ils vont pouvoir proliférer. Le changement climatique, en

altérant températures et précipitations, est donc susceptible d'influencer la fréquence, la répartition, l'aire de vie de nombreux agents infectieux responsables de pathologies, ce qui fait qu'il y a une préoccupation concernant la survenue de maladies infectieuses et de maladies infectieuses émergentes en lien avec ce changement climatique. Pour certaines pathologies, il est clair que leur fréquence ou leur aire de répartition va avoir tendance à croître. Pour d'autres, il se peut que l'évolution soit en sens inverse. Pour beaucoup d'entre elles, on n'a pas de quantification précise aujourd'hui.



3. Atténuation du changement climatique et santé

Nos sociétés réagissent à ces évolutions en tentant de s'adapter au changement climatique. Les choix que ces sociétés feront pour s'adapter peut avoir des conséquences directes et indirectes sur notre santé. Si, par exemple, on lutte contre les températures essentiellement

en généralisant les climatiseurs, il faut avoir conscience que ces climatiseurs, certes, rafraîchissent l'air intérieur, mais rejettent de l'air chaud dans le milieu extérieur. Cela favorise le phénomène d'îlots de chaleur et augmente la température à laquelle les gens qui n'ont pas les moyens d'avoir de climatiseur sont exposés. Ils émettent aussi, dans certains cas, des gaz qui sont nocifs pour la couche d'ozone et donc aussi nocifs pour notre santé. La couche d'ozone nous protège en effet des rayonnements ultraviolets dangereux et sa détérioration va augmenter la fréquence de cancers de la peau ou de problèmes de cataracte.

L'autre grande réaction de notre société est l'atténuation, c'est-à-dire la diminution des gaz à effet de serre et de leurs émissions. La neutralité carbone est ciblée. Pour y arriver, ça veut dire agir sur les principaux secteurs émetteurs de gaz à effet de serre. Or, ces secteurs sont tous liés à la santé... Les principaux secteurs émetteurs sont le transport, l'agriculture, le résidentiel, et la production d'énergie.

Le transport conditionne des émissions de particules fines émises par de nombreux véhicules à moteur thermique. Le transport conditionne la quantité d'activités physiques. Or, la sédentarité est un des principaux facteurs de risque de maladies cardiovasculaires et métaboliques. Selon les modalités par lesquelles on décarbone le secteur des transports, on va pouvoir éventuellement accroître cette activité physique et on va pouvoir limiter fortement les émissions de particules fines avec un bénéfice potentiel attendu sur notre santé qui peut être majeur.

L'agriculture est un autre secteur très émetteur. Il détermine notre alimentation qui est là aussi un facteur de risque pour notre santé. En

décarbonant notre agriculture, on va devoir aller vers une alimentation qui correspond à une part moins importante de viande et de produits laitiers. Ces produits, très émetteurs de gaz à effet de serre, sont associés à une santé moindre qu'un régime riche en céréales et en légumineuses, dont la production coûte beaucoup moins de gaz à effet de serre pour un gramme de protéines produites. Il y a donc un co-bénéfice majeur à décarboner le secteur agricole.

4. Conclusion

Le changement climatique est une menace importante pour notre santé. C'est une menace du point de vue des inégalités entre les territoires et les catégories sociales, mais la réaction qu'appelle ce changement climatique et la décarbonation des grands secteurs responsables des émissions de gaz à effet de serre constituent aussi une formidable opportunité d'améliorer la santé.

Ces co-bénéfices sanitaires de la décarbonation sont susceptibles de se manifester à beaucoup plus court terme que les bénéfices sur le climat et les températures, ce qui fait que cela peut être, pour les décideurs et la société, un formidable levier pour mettre en œuvre des changements assez importants dans tous ces secteurs du quotidien.

Nos sociétés ont ignoré la santé en adoptant un mode de vie reposant fortement sur les énergies fossiles. Il est essentiel, au moment où on s'apprête à décarboner des pans entiers de nos secteurs d'activités, que l'on place les inégalités sociales et la santé au cœur de la réflexion sur les trajectoires qu'on va emprunter vers cette société décarbonée.

Changement climatique, agriculture et sécurité alimentaire

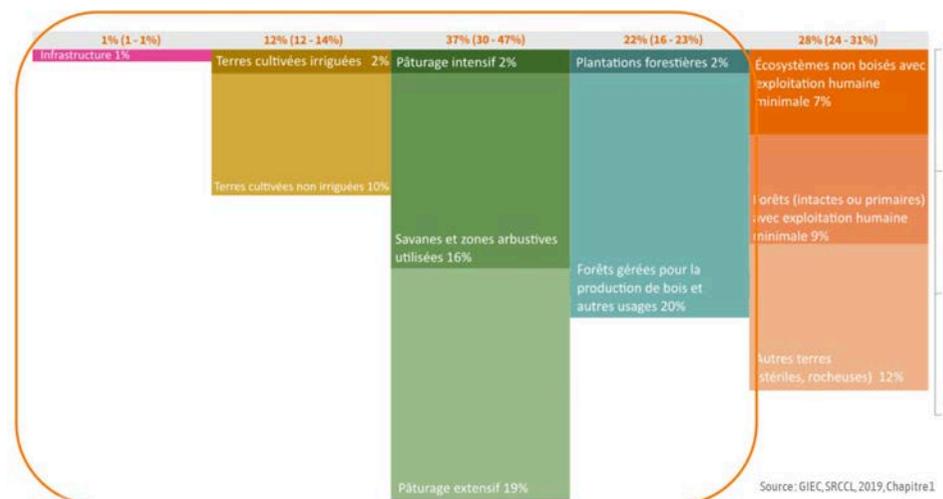


Jean-François SOUSSANA
Directeur de recherche à l'INRAE

1. La dégradation des terres aujourd'hui

Aujourd'hui, la pression d'utilisation des terres par l'homme est importante. Elle représente plus de 70 % de la surface des terres libres de glace de glace.

70% des terres libres de glace
sont impactées par les activités humaines



Cela correspond aux infrastructures, mais surtout aux terres cultivées (environ 10 %), aux pâturages (environ 35 %), et aux plantations forestières (environ 20 %). De ce fait, il reste comme superficie peu utilisée par l'homme, avec des écosystèmes qui sont peu perturbés, simplement 28 à 30 % des terres libres de glace.

Nous utilisons donc finalement une grande partie de la productivité primaire nette des écosystèmes continentaux. C'est une utilisation de l'ordre d'un quart à un tiers de la photosynthèse de cette productivité primaire pour l'alimentation, pour les fibres, le bois et l'énergie.

Par ailleurs, un quart de la surface terrestre libre de glace est sujette à des dégradations. Les sols se dégradent, c'est le cas avec l'érosion, qui se propage notamment en agriculture, avec des rythmes d'érosion qui sont de 10 à 100 fois plus importants que le taux de formation du sol. Le sol est un capital qui ne se renouvelle pas dans ces conditions, puisqu'il faudrait plus de temps pour le renouveler et nous l'utilisons trop rapidement.

Le changement climatique va s'introduire dans ce contexte où il y a déjà des pressions anthropiques fortes en aggravant la dégradation des sols, en particulier dans les zones côtières basses, mais aussi les deltas fluviaux, ceci du fait de l'intrusion des eaux marines dans les zones côtières et également des phénomènes d'inondation dans les zones fluviales, avec des phénomènes d'érosion renforcés. C'est le cas également pour les zones arides, où les alternances de sécheresse et de précipitations fortes vont renforcer la dégradation des terres. Et ceci concerne aussi les zones de pergélisol, là où les sols sont toujours gelés et là où ils vont commencer à dégeler et être exposés à la dégradation.

2. Les impacts déjà visibles sur la sécurité alimentaire

Le changement climatique a déjà affecté la sécurité alimentaire. On le voit du fait d'extrêmes climatiques, avec des régimes de précipitations fortes, une fréquence accrue de sécheresse, et par conséquent des expositions renforcées des populations à des périodes de famine et à des périodes de sous-nutrition. Dans les régions tropicales, on observe que les rendements des cultures diminuent. C'est le cas pour le maïs et le blé. C'est quelque chose qui se déroule avec des alternances d'événements extrêmes qui font chuter ces rendements, puis de périodes plus favorables.

On va trouver aussi des contre-exemples. Lorsqu'on est à des latitudes élevées, dans des climats froids, on observe que sous l'effet d'un réchauffement graduel, le rendement peut augmenter. C'est ce qui a été observé ces dernières décennies.

Par ailleurs, il y a des impacts sur l'élevage. Il y a une mortalité des cheptels. Dans la corne de l'Afrique, par exemple, c'est quelque chose que l'on connaissait, mais qui se renforce avec le changement climatique. Les systèmes pastoraux en Afrique sont très affectés, et on observe, dans beaucoup de régions du monde, une baisse de la productivité des élevages et de la croissance des animaux.

Le spectre des ravageurs et des maladies évolue. Dans les zones qui se réchauffent, il y a de nouveaux insectes, de nouveaux parasites, de nouvelles maladies qui arrivent et qui se développent puisque les hivers sont très doux. Cela nécessite de renforcer la protection des

cultures : c'est donc là aussi un problème pour l'agriculture et la sécurité alimentaire.

La stabilité de l'approvisionnement alimentaire va devenir incertaine avec l'augmentation du changement climatique.

C'est quelque chose qu'il faut vraiment regarder, puisque nous avons aujourd'hui, avec un réchauffement qui n'atteint pas encore 1,5 degré, déjà des périodes de famine qui peuvent toucher des populations du fait des sécheresses, du fait du renforcement de l'insécurité alimentaire. Cela entraîne aussi des déplacements de population, des migrations.

3. Projections et risques

Lorsqu'on va aller vers un réchauffement plus élevé, de l'ordre de 2°C au niveau mondial, plusieurs régions du monde vont être touchées simultanément. Cela veut dire que cela va créer, au niveau régional, des carences au niveau alimentaire, une sous-nutrition, et donc des chocs qui vont avoir une ampleur régionale. Si on va vers un réchauffement plus élevé, de l'ordre de 3°C à 4°C, c'est tout le système alimentaire mondial qui est menacé. On ne peut plus garantir que l'approvisionnement alimentaire pourra être maintenu dans ces conditions.

Ce sont des phénomènes que l'on essaye d'observer au niveau économique également, et l'on a, en médiane des modèles économiques, une augmentation de 7 % des prix des denrées

alimentaires d'ici à 2050, mais il y a beaucoup de variation entre ces modèles encore.

Un autre aspect est le risque pour la nutrition, avec les carences en micronutriments (ex : zinc, fer) qui touchent aujourd'hui pratiquement 1 milliard de personnes. L'accroissement du CO₂ atmosphérique va diluer les micronutriments dans les grains, dans les végétaux, et va finalement renforcer ces carences, qui touchent déjà une bonne partie de la population mondiale.

4. Quelles réponses ?

Dans le cadre de l'adaptation et de l'atténuation, il est possible de faire beaucoup de choses. Certaines de ces options de réponse peuvent aussi contribuer à d'autres enjeux, comme lutter contre la désertification et la dégradation des terres et améliorer la sécurité alimentaire. Ce potentiel est tout particulièrement important pour l'atténuation des émissions. Ces émissions liées à l'agriculture représentent environ un tiers des émissions totales de gaz à effet de serre d'origine anthropique. Il y a trois principales options :

- Utiliser le potentiel technique des options d'atténuation pour les cultures, les élevages, en introduisant par exemple l'agroforesterie. Cela représente plusieurs gigatonnes de CO₂ par an d'ici à 2050, ce qui est tout à fait important.
- Lutter contre les pertes et les gaspillages, qui contribuent à 8 à 10 % des émissions anthropiques de gaz à effet de serre, sachant qu'aujourd'hui, près de 30 % de la production alimentaire est

perdue ou gaspillée. Elle est perdue surtout dans les pays du Sud, puisqu'il y a des problèmes de logistique, de stockage. Elle est gaspillée tout particulièrement dans les pays riches dans lesquels on va perdre une partie de l'alimentation qui n'est pas consommée.

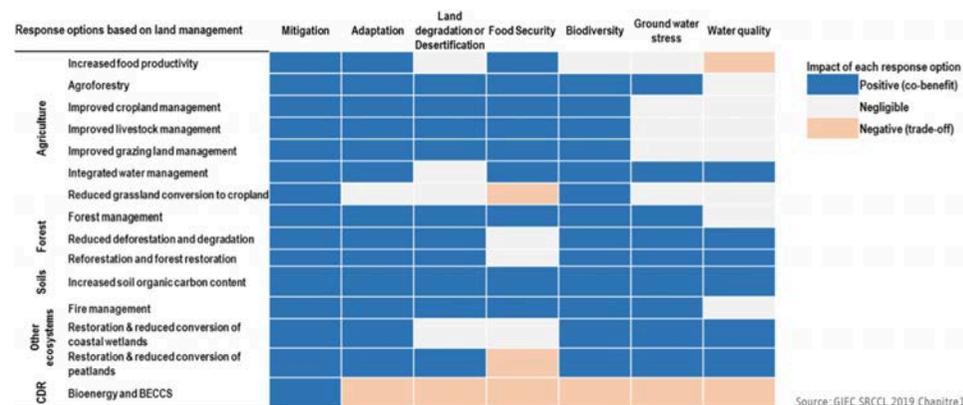
- Agir par la diversification des régimes alimentaires. On a aujourd'hui des excès, dans les pays de l'OCDE, pour la consommation, par exemple, de viande. Il y a un problème de nutrition avec cette consommation de viande, il y a des risques pour la santé lorsqu'elle est excessive. Si on abaisse cette consommation, si on diversifie l'alimentation, avec plus de fruits, de légumes, de protéagineux, de noix, on peut avoir un rééquilibrage et des effets positifs pour la santé. Et cela va s'accompagner de changements en agriculture, avec des systèmes intégrés, des assolements diversifiés et des élevages qui peuvent être résilients et à faible émissions.

C'est donc un message : si on peut rééquilibrer les régimes alimentaires, si on peut aller vers des co-bénéfices pour la santé, on aura des transitions alimentaires qui pourraient libérer des millions de kilomètres carrés de terres et apporter une atténuation des émissions qui pourrait être importante. Pour bien l'expliquer, il faut mentionner qu'une grosse partie des productions végétales sont aujourd'hui transformées par les élevages, avec une efficacité de transformation qui est assez faible. Si vous consommez directement des produits végétaux, vous sautez l'étape élevage, vous évitez des émissions de gaz à effet de serre et vous avez des systèmes alimentaires moins émetteurs et avec des co-bénéfices pour la santé.

5. Recherche de co-bénéfices

Les réponses intégratives, qui peuvent apporter des co-bénéfices, ont été évaluées dans le rapport spécial du GIEC sur l'occupation des terres.

Co-bénéfices et arbitrages



C'est un tableau (ci-dessus) dans lequel on trouve, à gauche, la nature des options : en agriculture, pour les forêts, pour les sols, pour les autres écosystèmes, comme les zones humides, les tourbières. On a dans les colonnes les effets. Lorsqu'ils sont en bleu, ils sont positifs et ce sont des co-bénéfices pour l'atténuation, l'adaptation, la dégradation des terres, la sécurité alimentaire, la biodiversité, les ressources en eau. Il y a beaucoup de bleu dans ce tableau et c'est une bonne nouvelle.

On peut déployer ces options. Vous avez des options, par exemple, sur l'augmentation du carbone organique du sol, qui sont vertueuses pour

tous les enjeux. On peut restaurer également des écosystèmes, on peut avoir des options d'amélioration de la gestion des cultures, des élevages. On peut aussi lutter contre les incendies.

Il y a une exception en bas du tableau, avec beaucoup de cases en orange. Il s'agit des bioénergies. En effet, si on déploie les bioénergies à grande échelle, par exemple avec des cultures énergétiques, qui sont le plus souvent des monocultures, ou en faisant du reboisement à très grande échelle, les effets vont être négatifs d'une part pour la biodiversité et d'autre part pour la sécurité alimentaire puisqu'on va prendre des terres qui initialement avaient une vocation alimentaire. Il y a donc des limites à ce qu'on peut faire avec ces bioénergies, de l'ordre de 1 million de kilomètres carrés si la population est importante, et jusqu'à 4 millions de kilomètres carrés si la croissance de la population est plus faible et si on a de meilleures politiques environnementales pour limiter les effets négatifs de ces bioénergies.

Atténuer le changement climatique : quels défis économiques ?



Christian DE PERTHUIS

Professeur émérite à l'université Paris Dauphine

1. La neutralité carbone

Depuis l'adoption de l'Accord de Paris, les objectifs en termes d'atténuation du réchauffement climatique sont généralement posés en termes de neutralité. Ainsi, l'Union européenne s'est fixée comme objectif d'atteindre la neutralité climat en 2050. Pourquoi exprime-t-on ces objectifs en termes de neutralité ? Car ce qui réchauffe la planète n'est pas le flux annuel de nos émissions, c'est le stock de gaz à effet de serre qui s'accumule dans l'atmosphère. La neutralité climat est la situation dans laquelle les émissions brutes de gaz à effet de serre d'origine anthropique qui rentrent dans l'atmosphère sont ramenées à la capacité d'absorption des gaz à effet de serre par ce qu'on appelle les puits de carbone. On stabilise le stock de gaz à effet de serre et, par conséquent, on stabilise le réchauffement climatique.

2. Carbone fossile et carbone vivant

Pour nos sociétés, la marche vers la neutralité climatique implique deux grandes transformations. La première concerne le carbone

fossile. Aujourd'hui, encore près de 80 % de l'énergie consommée dans le monde provient de trois produits : le charbon, le pétrole et le gaz. Ceci est à l'origine de près de 70 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Il n'y a pas de marche vers la neutralité climat si on n'opère pas très rapidement une révolution énergétique qui consiste tout simplement à nous affranchir de cette dépendance aux énergies fossiles. C'est ce qu'on appelle communément la transition énergétique. Imaginez qu'en 2050, l'Europe ait totalement supprimé l'utilisation de l'énergie fossile. Serions-nous pour autant à l'état de neutralité climat ?

Tout dépend de ce qui se passe sur le deuxième grand volet de la transition bas carbone qui concerne non plus le carbone fossile, mais le carbone vivant. C'est le carbone produit grâce à la photosynthèse par tous les végétaux qui produisent les chaînes carbonées et qui nous permettent de nous alimenter et de nous intégrer dans cette grande chaîne du vivant. Aujourd'hui, la façon dont les Hommes travaillent ce carbone vivant est à l'origine de 25 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre. C'est la deuxième jambe sur laquelle repose la marche vers la neutralité.

3. La transition énergétique sous l'angle économique

Depuis un siècle et demi, nous sommes dans des transitions énergétiques, mais toujours sur un modèle de l'empilement des sources d'énergie les unes sur les autres. La transition bas carbone est un changement de logiciel. Il va falloir basculer depuis cette logique

de l'empilement des sources vers une logique de substitution dans laquelle on retire des sources d'énergie fossile.

Ceci a deux implications majeures pour l'économiste. La première est qu'il ne suffit pas uniquement d'agir sur l'offre d'énergie, il va falloir agir sur la demande énergétique. Il va falloir énormément réduire toutes les consommations superflues et inutiles. C'est ce qu'on appelle la sobriété énergétique. Pour l'économiste, la sobriété énergétique signifie trouver les moyens de créer une certaine forme de rareté sur la demande d'énergie. Quels instruments pouvons-nous utiliser pour créer cette rareté ? Il y a un instrument assez direct : la taxe. On renchérit le coût d'usage des fossiles en taxant le CO₂. Alors les consommateurs vont rationner leur demande car ils n'auront pas assez d'argent pour payer. On peut mettre en place un système avec des quotas. Les quotas cessibles, c'est un système dans lequel on met des quotas avec un prix du quota du CO₂ qui va également renchérir le coût d'usage des énergies. À mes yeux, la meilleure façon d'accélérer la transition énergétique, au plan européen, au plan local, au plan international, serait de faire de la tarification carbone redistribuée. Vous tarifiez le carbone pour renchérir l'usage des énergies fossiles et vous réutilisez le produit de la taxe ou le produit des ventes de quotas pour justement investir dans l'accès à l'énergie ou dans le soutien des populations qui n'ont pas suffisamment accès à l'énergie indispensable pour le fonctionnement de la société.

4. La transition agroécologique sous l'angle économique

Le deuxième volet de la transition bas carbone est la transition agroécologique. Elle pose des problèmes un peu plus complexes pour l'économiste. Il ne s'agit pas uniquement de retirer trois produits, le charbon, le pétrole et le gaz, du système énergétique. Il s'agit en réalité de réinvestir dans la diversité du vivant, avec trois points de repère importants.

Le premier concerne les systèmes agricoles. Depuis un siècle, on a développé des systèmes d'agriculture fortement industrialisés, très spécialisés, dans lesquels une abondance de produits chimiques, notamment, nous donnerait l'illusion de contrôler la nature, de forcer les systèmes naturels. On voit que ces systèmes d'agriculture arrivent à bout de souffle. À long terme, ils épuisent le sol et ils sont très peu résilients par rapport aux impacts du réchauffement climatique.

Le premier volet de la transition agroécologique va consister à transformer les techniques de production agricole en basculant vers des systèmes où on utilise la biodiversité pour produire plus. Sous l'angle des incitations économiques, ça pose des problèmes. Car si on veut inciter les agriculteurs à mieux respecter la biodiversité, il faut donner une valeur à cette biodiversité. Or cette valeur ne s'exprime pas spontanément sur les marchés. Il faut donc créer des dispositifs qui permettent de rémunérer les services écosystémiques qu'apporte l'agroécologie.

Le deuxième levier de cette transition agroécologique concerne la demande. Comme pour la transition énergétique, on n'arrivera pas à la transition agroécologique si on n'élimine pas de la demande finale et de la consommation alimentaire les produits les plus émetteurs. De très loin, les produits les plus émetteurs sont issus de l'élevage et principalement les produits de l'élevage des ruminants, des bovins et des ovins. Cette transition alimentaire et agricole pose un problème d'incitation sous l'angle des consommateurs. Quels sont les bons leviers pour convaincre les consommateurs de changer leur consommation alimentaire ? On a un certain nombre de leviers intéressants sous l'angle sanitaire, mais ça ne suffit pas, et surtout, du côté de l'offre agricole, quels sont les bons systèmes agricoles qui vont fonctionner non pas avec plus du tout d'animaux, mais avec des animaux moins nombreux ?

Le troisième volet concerne les puits de carbone. La protection des puits de carbone est un enjeu majeur et pose deux types de questions. Le premier est qu'il faut freiner les impacts anthropiques qui sont principalement la déforestation tropicale et la pratique de systèmes agricoles qui ne respectent pas le couvert végétal et qui utilisent trop de labours. La clé pour agir contre ces systèmes anthropiques, y compris pour la déforestation, est d'agir sur les causes agricoles de la déforestation. Pour l'économiste, on revient un peu à la première question sur comment on peut transformer dans le long terme les systèmes de production agricole. Le second est que le réchauffement climatique exerce lui-même un impact sur la capacité des puits de carbone. C'est ce qu'on appelle une rétroaction climatique. C'est plus complexe... on voit par exemple qu'aujourd'hui, la capacité de stockage des forêts est en train d'être altérée par le réchauffement climatique, même quand on élargit les superficies forestières. C'est le

cas, par exemple, en France où, entre 2005 et 2021, cette capacité de stockage a été très fortement amoindrie, parce que les sécheresses, les intempéries, et les incendies réduisent la capacité de croissance des arbres. La protection des puits de carbone, pour l'économiste, va être un enjeu très important et les leviers à mettre en place sont extrêmement complexes, divers suivant les différents milieux naturels.

À mes yeux, pour viser la neutralité carbone dans les années qui viennent, on va se rendre compte que la question du carbone vivant va devenir la plus complexe pour la société, ainsi que pour les économistes qui n'ont pas encore aujourd'hui toute la boîte à outils qu'ils ont développée pour la transition énergétique.

L'Europe face au défi du changement climatique



Gonéri LE COZANNET

Chercheur au BRGM

1. Les risques clés en Europe en lien avec le changement climatique

En février 2022 est paru un rapport du GIEC sur les impacts, la vulnérabilité et l'adaptation qui comprend un chapitre sur l'Europe. Ce chapitre identifie quatre risques clés :

- 1) les vagues de chaleur avec des conséquences pour la santé des personnes et pour les écosystèmes,
- 2) les pertes de rendement agricole dues aux vagues de chaleur et aux sécheresses,
- 3) les pénuries d'eau qui affectent le monde agricole mais également la production d'électricité, les barrages, les centrales thermiques, et les particuliers,
- 4) les inondations côtières en raison de l'élévation du niveau de la mer et les inondations continentales en raison des pluies intenses.



Vous avez ci-dessus une photo qui illustre une inondation continentale liée à un épisode de pluie intense, en 2016. Cet évènement a coûté à peu près 1,4 milliards d'euros de dommages assurés. Il a deux fois plus de chances de se produire aujourd'hui que dans un climat préindustriel.

Au-delà de ces quatre risques clés, on a une série de risques en cascade qui peuvent concerner les feux de forêt ou les risques pour le système assurantiel et financier ou les risques de pertes de chaîne de production. Plus le réchauffement climatique va s'aggraver et plus ces risques deviendront intenses.

Si on prend l'exemple du risque sur la santé humaine et la mortalité, on voit par exemple que jusqu'à 0,7°C de réchauffement, on a très peu d'effets sur la santé humaine du réchauffement climatique en Europe.

Entre 0,7 et 1,5°C, on a des effets qu'on va qualifier de modérés, comme des morts pendant les canicules, mais en nombre suffisamment limité pour ne pas mettre en danger les systèmes de santé. Puis, plus on monte dans les températures globales et à l'échelle de l'Europe, plus on va vers des risques graves jusqu'au moment où on atteint les limites à l'adaptation : autour de 3°C de réchauffement climatique, on atteint des limites à l'adaptation, et on peut avoir autour de 90 000 morts par an en Europe et des systèmes de santé - dans le sud de l'Europe - qui présentent un risque d'effondrement.

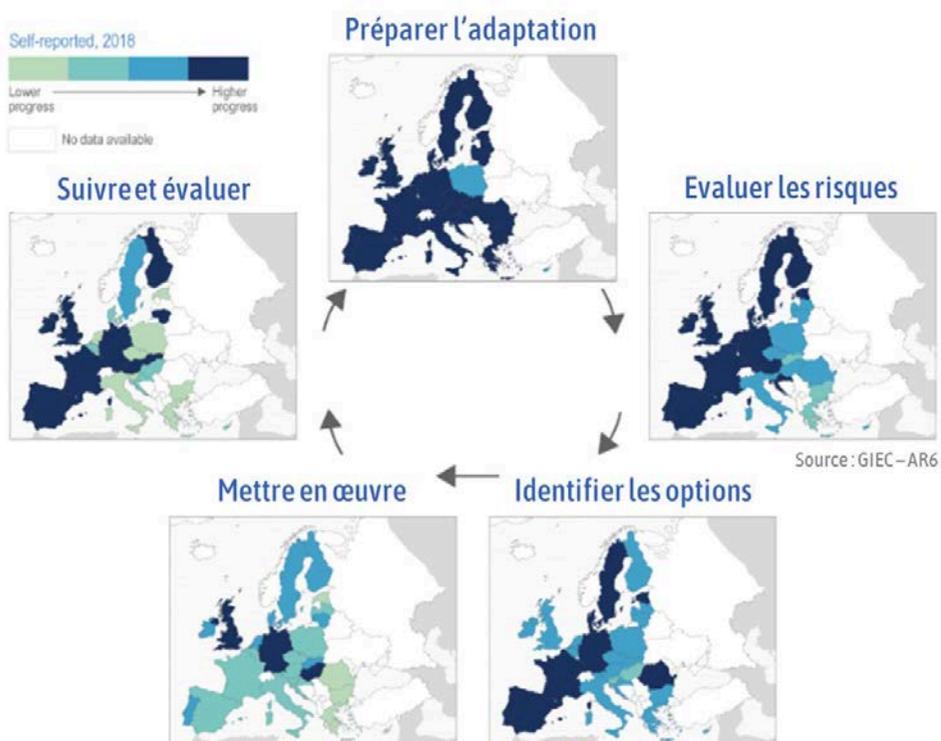
2. L'adaptation au changement climatique en Europe

Face au changement climatique, on a une adaptation qui est réelle et qui progresse, mais qui reste insuffisante face à la rapidité des changements. C'est illustré ci-dessous à travers les plans nationaux d'adaptation.

Ces plans nationaux sont l'un des dispositifs pour l'adaptation, mais il y en a de nombreux autres : plans régionaux, plans des villes, actions des acteurs privés, etc. On voit par exemple que la France est relativement satisfaite de la manière dont elle prépare l'adaptation, évalue les risques, identifie les options, et suit et évalue son adaptation au niveau national. En revanche, en termes de mise en œuvre, elle est moins satisfaite. Si on regarde la Grande-Bretagne, on voit qu'elle est plus satisfaite de sa mise en œuvre. Malgré cela, l'équivalent du Haut conseil pour le climat de la Grande-Bretagne

considère que la Grande-Bretagne est moins bien préparée au changement climatique qu'en 2015, simplement parce que l'adaptation allait trop lentement par rapport à un changement climatique qui allait très vite. En d'autres termes, on a un fossé entre la planification et la mise en œuvre de l'adaptation, et ce fossé continue de se creuser.

Progrès des Etats en matière d'adaptation

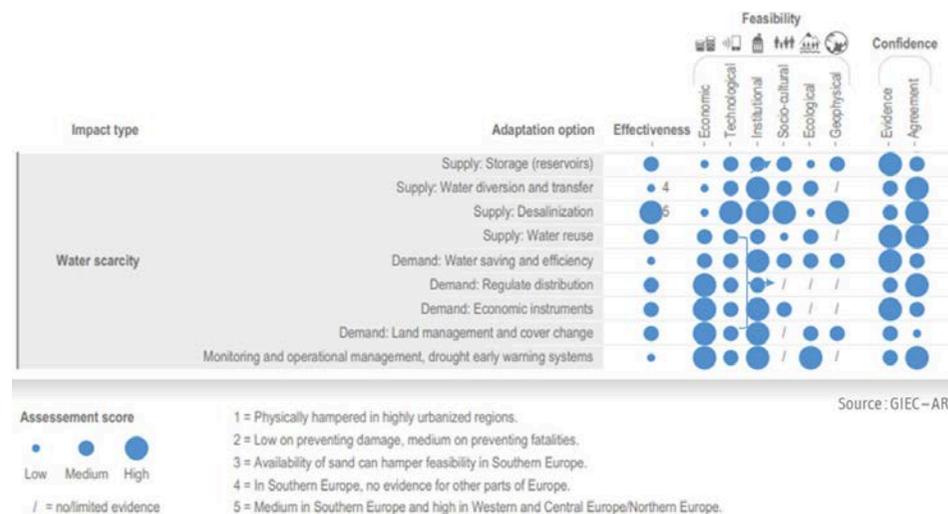


3. Faisabilité et efficacité des mesures d'adaptation

L'enjeu est de sortir d'une adaptation qui est souvent très locale et limitée à un segment d'activité et d'aller vers des transformations qui soient vraiment susceptibles de nous mettre dans de bonnes situations face au changement climatique, voire peut-être d'améliorer les conditions de vie.

Le rapport du GIEC évalue les mesures d'adaptation au regard de leur efficacité et de leur faisabilité, dans différents secteurs comme la santé humaine, les inondations, l'agriculture. Ici, nous nous intéressons aux pénuries d'eau (figure ci-dessous).

Le cas de l'eau



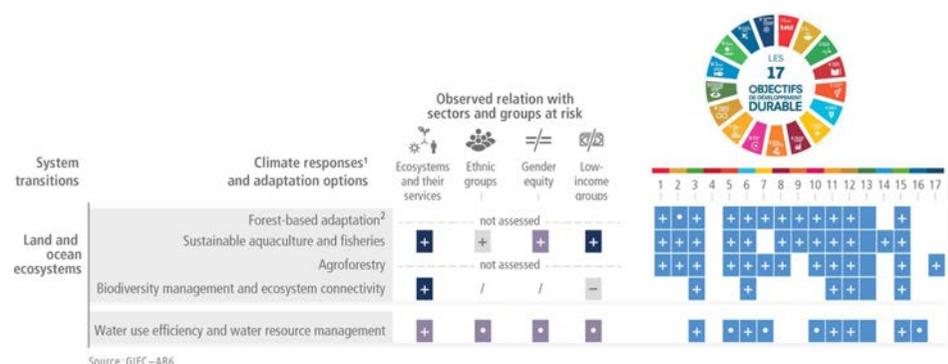
Aujourd'hui, on observe qu'en Europe les mesures d'adaptation consistent surtout à augmenter l'offre d'eau. Ça va être par exemple le stockage d'eau dans les nappes ou en surface, la désalinisation d'eau de mer, ou encore la réutilisation de l'eau usée. Si on prend le cas du stockage, on voit que l'efficacité est limitée car avec le réchauffement climatique, on a davantage d'évaporation et de transpiration des plantes. Lors des sécheresses, on aura donc plus vite des situations de tension sur la ressource en eau. En termes de faisabilité, la faisabilité économique est relativement limitée dans la mesure où ce sont des infrastructures qui coûtent cher. Par contre, il y a un soutien institutionnel à ce type de solution. Aussi, on a des compromis en termes écologiques parce que l'eau qui est prélevée pour être stockée dans des réservoirs manquera tout simplement à des écosystèmes de rivières ou à des estuaires.

Si on regarde l'ensemble des mesures disponibles, on a toute une série de mesures moins bien développées aujourd'hui qui concernent la demande. Ce sont par exemple des réglementations qui permettent d'éviter une demande trop forte en eau, ou alors des instruments économiques comme une tarification de l'eau progressive. Ça peut être également une concertation entre usagers ou l'utilisation de cultures qui sont moins demandeuses en eau. Économiquement, ces mesures sont intéressantes car elles sont très peu coûteuses. D'un point de vue institutionnel, elles sont soutenues mais nécessitent peut-être une volonté de coopérer. Aussi, l'intérêt qu'on peut voir de ces mesures orientées demande est qu'elles limitent les conflits entre usagers. En revanche, ces mesures orientées « demande », seules, sont moyennement efficaces et doivent être combinées aux mesures orientées « offre » afin de faire face à cette pénurie d'eau liée au changement climatique.

4. Compromis

Un autre moyen d'évaluer les mesures d'adaptation est de regarder les coûts-bénéfices et les compromis de chaque mesure, au regard notamment des 17 Objectifs de Développement Durable (figure ci-dessous).

Adaptation et Objectifs de Développement Durable

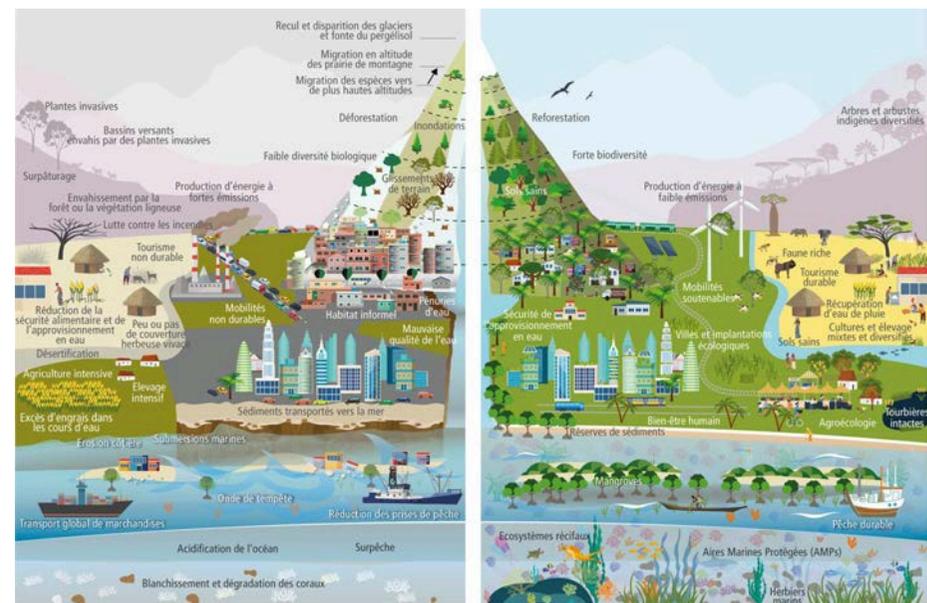


À chaque fois que vous avez un « plus », c'est que l'Objectif de Développement Durable concerné est favorisé par la mesure d'adaptation. La bonne nouvelle est que la plupart des mesures d'adaptation s'accompagnent d'avantages pour l'économie, le bien-être et les écosystèmes. Mais ce n'est pas le cas de toutes. On a l'exemple des infrastructures côtières qui constituent un compromis : on offre de la sécurité dans les villes contre les inondations, mais on perd des espaces pour les écosystèmes. Si on prend l'exemple des mesures qui concernent la terre et les écosystèmes côtiers, océaniques et terrestres, on voit que l'agroforesterie est une mesure qui est très bien évaluée. Elle permet, par exemple, d'avoir une eau de meilleure

qualité, de conserver davantage d'écosystèmes terrestres, et puis d'aller vers une meilleure santé. Cette mesure est donc très bien évaluée au regard des Objectifs de Développement Durable.

5. Conclusion

Dans ce sixième rapport du GIEC, on voit toute une série de mesures d'adaptation qui sont vraiment des transformations et qui nous permettent de nous adapter à un changement climatique qui est déjà là. Malheureusement, on ne va pas dans cette direction. On va plutôt vers la figure de gauche (ci-dessous) qui est une illustration très schématique, mais qui montre bien vers quoi on va : des pertes massives de biodiversité marine, de biodiversité terrestre, des risques pour la production alimentaire, des villes dans lesquelles les îlots de chaleur urbains sont amplifiés par le manque de végétation et par la pollution de l'air liée à des transports qui sont toujours carbonés. A droite, on a un monde dans lequel on a atteint les Objectifs de Développement Durable, on a limité le réchauffement climatique, on s'y est adaptés, et on a limité les pertes de biodiversité. Dans ce monde, on a réussi à mettre en œuvres des Aires Marines Protégées, sans pêche, l'agroécologie, qui est une solution pour l'agriculture qui consiste à limiter les intrants, les nitrates, les phosphates, les pesticides, pour offrir des possibilités aux écosystèmes sauvages de s'adapter au changement climatique. C'est également un monde dans lequel on a des villes avec une production d'énergie décarbonée, avec de la végétation pour limiter les îlots de chaleur urbains, et également avec des transports décarbonés et de la place pour la marche, le vélo, les transports en commun. Aujourd'hui, malheureusement, on ne va pas vers ce monde dans lequel on a réussi ces transformations.



La question est « comment faire pour accélérer ? ». Car on a des signaux faibles que l'on avance dans ces questions d'adaptation mais de manière beaucoup trop lente. On a toute une section du rapport du GIEC qui examine les conditions favorables à une accélération de l'adaptation. Ces conditions favorables incluent un engagement politique à tous les niveaux de gouvernement avec des objectifs clairs, et également, une gouvernance qui soit inclusive, avec des participations directes qui mettent en priorité l'équité et la justice.

Finalement, ce qu'on cherche à obtenir, ce n'est pas seulement s'adapter au changement climatique, mais également l'atténuer, limiter les pertes de biodiversité, améliorer la santé, la qualité de vie, l'économie, et tout ceci, c'est ce que le rapport du GIEC appelle le développement résilient face au changement climatique.

Changements climatiques en Méditerranée

Stéphanie THIEBAULT
Directrice de recherche au CNRS



La région méditerranéenne regroupe les 22 pays et territoires des rives sud et nord de la Méditerranée. Elles sont peuplées par environ 150 millions d'êtres humains.

1. Le climat méditerranéen

Cette région est caractérisée par un climat avec des hivers doux et des étés chauds et secs, les températures moyennes dépassant généralement 30 degrés. Au sud, l'été est caractérisé par des températures élevées et par un manque de pluie entraînant une sécheresse et des conditions arides très marquées. Les précipitations totales annuelles présentent une grande variabilité. Elles vont de moins 200 millimètres de pluie par an en Afrique du Nord et dans la péninsule arabique à 2 000 millimètres par an dans les régions montagneuses du nord. Les précipitations hivernales représentent entre 30 % sur la rive nord et 80 % sur la rive sud des précipitations annuelles totales.

La biodiversité de la région méditerranéenne est exceptionnellement riche, avec 250 espèces ligneuses et de très nombreuses espèces

animales ou végétales. La plupart des arbres sont dits sempervirens, c'est-à-dire qu'ils gardent leurs feuilles toute l'année, et sont adaptés à certains niveaux de sécheresse. Les paysages méditerranéens, garrigue sur sol calcaire ou maquis sur terrain siliceux, sont en fait un héritage de plusieurs millénaires de gestion et d'exploitation de l'environnement par les sociétés humaines.

2. Les changements passés en Méditerranée

Située dans une zone de transition entre le climat tempéré des latitudes moyennes et le climat plus chaud et sec de l'Afrique du Nord, la région est reconnue comme étant l'une des régions du monde particulièrement sensibles au changement climatique.

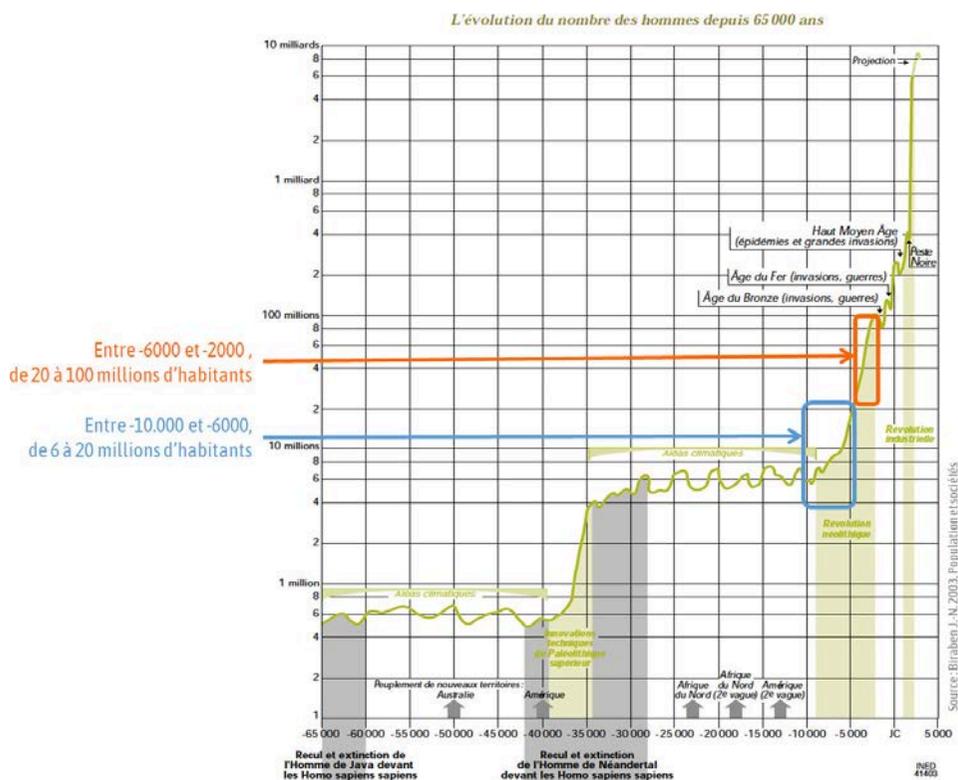
Depuis plus de 40 ans, les recherches sur les paléoenvironnements qui se fondent sur les archives du sol (étude des sédiments marins, des marées, des tourbières et des fleuves), témoignent de l'impact des sociétés humaines sur les écosystèmes méditerranéens sur le temps long. Ces recherches apportent aussi la preuve d'instabilités climatiques qui ont eu lieu dans le passé. Des périodes de changement climatique rapide faisant alterner des périodes plus chaudes qu'actuellement suivies d'épisodes frais et pluvieux, qui à leur tour sont suivis de phases d'aridité, se sont succédé au cours des dix derniers millénaires.

Les écosystèmes méditerranéens ont connu une occupation humaine très ancienne. Les premiers agriculteurs éleveurs prennent possession des terres il y a plus de douze millénaires en Méditerranée orientale. Le développement de l'agriculture et de l'élevage, appelé

néolithique, a pour conséquences, d'une part, le remplacement de la forêt par des cultures qui, sur les terres les plus fragiles, dégradent rapidement les sols, et, d'autre part, par une augmentation spectaculaire de la population, comme on le voit sur le schéma ci-après.

C'est ce qu'on appelle la transition démographique agricole. Entre -10 000 et -6 000 ans, on passe de six à 20 millions d'habitants, puis, entre -6 000 et -2 000, on passe de 20 à 100 millions en moins de trois millénaires.

La Transition Démographique Agricole



3. Changement climatique actuel : quels risques ?

Les tendances observées sur le dernier demi-siècle montrent les évolutions des composants du cycle de l'eau, avec une augmentation de la température et de l'évaporation, et une diminution des précipitations et des apports des fleuves à la mer. L'eau douce est rare et inégalement répartie dans le temps et dans l'espace. Les projections climatiques des modèles, qu'ils soient globaux ou régionaux, indiquent que ce réchauffement et cet assèchement vont se poursuivre. Aujourd'hui, on voit bien que c'est un problème qui est récurrent. Leur amplitude dépendra, après 2050, des scénarios d'émissions des gaz à effet de serre, notamment. La situation actuelle s'aggrave en raison de l'augmentation de la demande d'eau liée à la croissance démographique et au développement économique.

La région méditerranéenne concentre tous les principaux risques naturels. Les fortes précipitations entraînent des crues soudaines, des vents violents, et de fortes houles en découlent. Il faut ajouter des vagues de chaleur et des sécheresses accompagnées de forts incendies de forêt, comme on le voit chaque année, maintenant. Ces risques affectent en fait toutes les populations qui y vivent.

La Méditerranée, de plus, constitue l'un des plus grands réservoirs de biodiversité à l'échelle mondiale. Des millions de personnes dépendent directement ou indirectement des services écosystémiques rendus par la biodiversité, notamment l'approvisionnement en ressources marines.

Plus qu'un point chaud de biodiversité marine, la Méditerranée est désormais un point chaud du changement global ou changement climatique et autres pressions d'origine humaine, c'est-à-dire la

surexploitation, les pollutions, la destruction des habitats, qui agissent indépendamment ou en synergie.

L'ensemble des modifications induites par ce changement global conduit dans la mer à un bouleversement des composantes biologiques des écosystèmes, des producteurs primaires comme les algues et les phytoplanctons au plus haut niveau trophique des poissons prédateurs. Les invasions biologiques se multiplient. Ainsi, les espèces non indigènes de la Méditerranée sont des espèces thermophiles originaires de la région tropicale de l'Indo-Pacifique. C'est ce qu'on appelle des migrations lessepsiennes, c'est-à-dire qui passent par le canal de Suez, construit par Ferdinand de Lesseps. La Méditerranée devient une mer tropicale. Au total, plus de 900 espèces exotiques ont été recensées.

L'élévation du niveau de la mer représente aussi un défi majeur. Les risques liés aux inondations et au retrait du littoral sont préoccupants, notamment là où les populations, les biens culturels, industriels et environnementaux sont concentrés, c'est-à-dire près des côtes. Les effets sont multiples, et notamment sur la santé, avec le développement d'agents pathogènes et leurs hôtes vecteurs et réservoirs. De plus, les diverses pollutions influencent le développement de maladies chroniques. Il y a aussi des effets sur les migrations. La Méditerranée est une frontière et un point de passage entre des ensembles régionaux opposés aux plans économique et social. C'est un lieu où, depuis plusieurs années, on observe la tragédie des migrants cherchant à rejoindre les rivages de l'Union européenne.

4. Villes et agriculture méditerranéennes

La ville ou les systèmes urbains sont des objets socio-environnementaux particulièrement importants pour les défis du changement climatique. La rive sud de la Méditerranée est engagée dans une transition urbaine comme la rive nord l'a été il y a déjà quelques décennies. Cela rend nécessaire une gestion de ville plus intégrée pour un développement soutenable. Il convient de considérer la gestion des déchets, la question énergétique, les transports, l'aménagement des cours d'eau, les règles et principes d'urbanisme, l'intégration sociale comme les différents éléments du même puzzle. Mais ce puzzle est d'une extraordinaire complexité, et le défi est maintenant de savoir comment l'assembler avec toutes les parties prenantes. Les urbanistes, comme le montre la photo de cette maquette (ci-dessous), ne semblent pas du tout encore l'avoir compris et en tenir compte.



Enfin, il y a les conséquences sur l'agriculture. Les projections montrent que les risques de sécheresses et de températures élevées associées aux contraintes du sol, de l'eau et des dangers d'incendies menacent terriblement l'agriculture.

L'adaptation à l'aléa climatique est néanmoins une habitude ancienne, dans cette zone. La culture de légumes secs ou d'autres cultures tolérantes à la sécheresse comme les olives, le raisin, les amandes, la transhumance, l'utilisation de terrains de parcours et le fourrage arboré consommé par le bétail, ou encore les techniques de capture de l'eau font partie des solutions ancestrales pour répondre au problème de la pluviométrie irrégulière et des étés caniculaires, comme le montre la photographie passée qui montre les cultures à Malte, qui sont très adaptées, puisqu'il n'y a aucune ressource en eau sur cette île.



Cependant, la région va devoir devenir de plus en plus dépendante des importations agricoles. Si les races locales de petits ruminants, moutons et chèvres, sont adaptées à des environnements contraignants, leur patrimoine génétique, malheureusement, est menacé. Les graminées fourragères pérennes représentent une alternative aux céréales en raison de leurs exigences modestes, de leur capacité à recouvrir le sol toute l'année et de leur utilisation optimale de l'eau. De même, bien qu'adaptée, la fructiculture est confrontée aujourd'hui à l'augmentation de la température, à la salinité du sol, à la diminution des réserves en eau. Hot spot de biodiversité à l'échelle mondiale, berceau de la domestication animale, de nombreux parents sauvages ainsi qu'un grand nombre de cultivars de races traditionnelles survivent néanmoins encore.

Le rôle des savoirs locaux doit absolument être réétudié dans la configuration de paysages et de l'agrobiodiversité. La maîtrise de l'occupation des sols et de l'urbanisation constitue un élément essentiel des politiques de prévention des risques. En définitive, l'amélioration des prévisions concernant les sécheresses, les pluies et les crues, combinée à une meilleure organisation de l'information des populations et des services de secours, constituerait un autre type de mesures d'adaptation et de prévention des risques.

Malheureusement, ces mesures n'éviteront pas la survenue de catastrophes, mais permettront, espérons-le, d'en limiter notablement les conséquences.

Le changement climatique : une réalité en Normandie

Benoît LAIGNEL

Professeur à l'université de Rouen Normandie

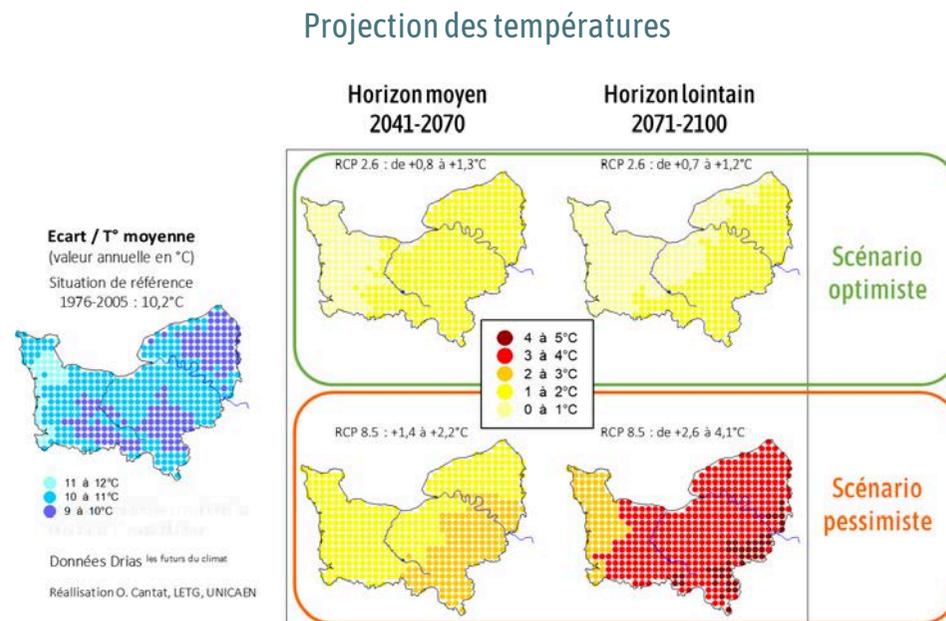


Ces dernières années, plusieurs groupes d'experts régionaux d'études sur le changement climatique ont été créés. L'objectif est d'apporter des connaissances sur le changement climatique et ses conséquences à l'échelle régionale et sur cette base de massifier les actions sur les territoires. L'exemple pris ici est celui du travail mené dans le cadre du GIEC normand.

1. Le changement climatique en Normandie : températures

Le réchauffement climatique est une réalité en Normandie. Quand on applique les anomalies de température en comparant la période actuelle avec la période de 1951 à 1980, on constate sur toutes les stations météorologiques normandes des anomalies de température entre +0,6 et +0,8°C. Une autre méthode est de tracer des tendances et de les tester statistiquement. Quand on l'applique, on constate que toutes les stations montrent des élévations de température entre +1,2 et +2°C depuis 1970.

Du côté des projections, quand on compare la carte en bleu, qui représente les températures moyennes en Normandie, avec les autres cartes, vous voyez une évolution vers des couleurs chaudes, jaune et rouge, avec le scénario RCP 2.6 en haut et le scénario RCP 8.5 en bas, qui sont les scénarios optimiste et pessimiste (figure ci-dessous). Ceci témoigne d'un réchauffement climatique compris entre +0,7 et +4,1°C, suivant les scénarios ou les secteurs que l'on regarde.

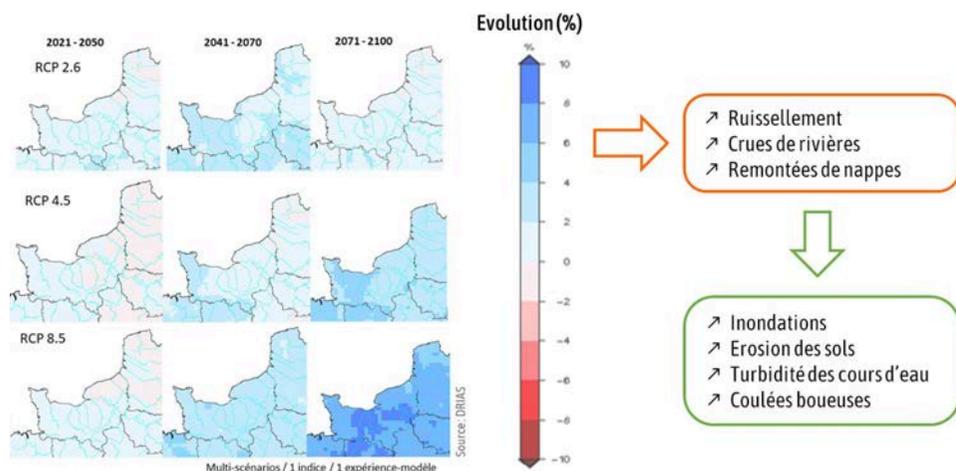


2. Inondations et ressource en eau

Un autre impact est celui des inondations, en lien notamment avec l'augmentation des précipitations intenses. Sur les cartes ci-dessous, on voit une évolution vers des couleurs de plus en plus bleues qui témoignent d'une augmentation entre +2 et +10 % de l'intensité des

précipitations. Cela va conduire à une augmentation du ruissellement, des crues de rivières et des remontées de nappes dans certains secteurs, et, *de facto*, à une augmentation de la fréquence et de l'intensité des inondations, de l'érosion des sols, de la turbidité des cours d'eau et des coulées boueuses.

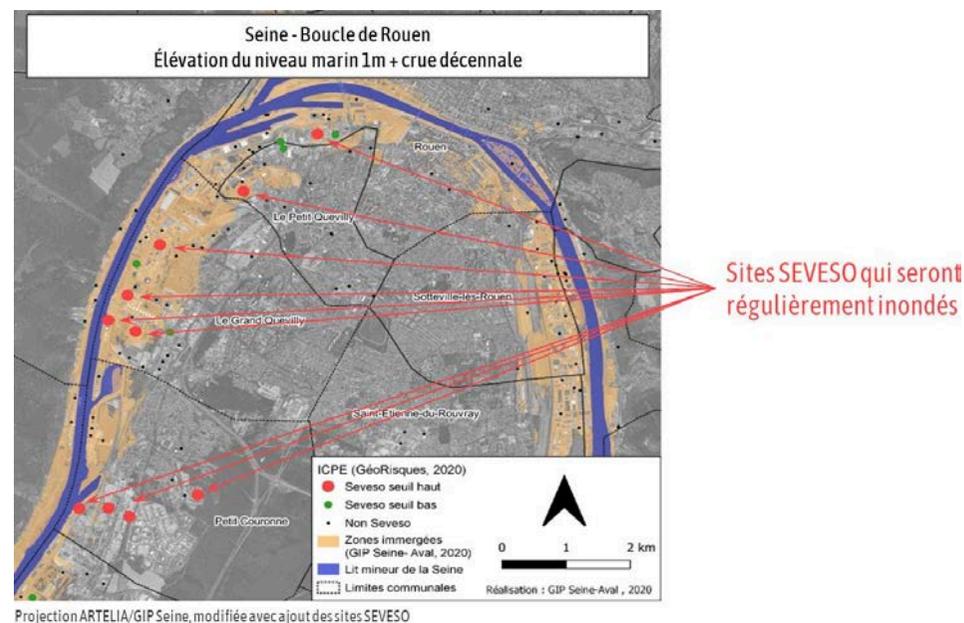
Précipitations intenses



Quand on combine ces précipitations intenses qui vont donner des crues au niveau des rivières littorales avec l'élévation du niveau des mers comprise entre 40 centimètres et 1,10 mètre ainsi que les tempêtes, on va aller vers une augmentation de la fréquence et de l'intensité des inondations dans les estuaires, liées à des phénomènes de blocage de l'écoulement des cours d'eau, une augmentation de la fréquence et de l'intensité des inondations dans les zones côtières, et également une accélération du recul du trait de côte.

Pour illustrer ces phénomènes de blocage de l'écoulement des cours d'eau, une simulation a été réalisée sur l'estuaire de Seine sur la boucle de Rouen. On observe les zones inondées, en orange, avec des points rouges qui correspondent aux sites SEVESO qui seront régulièrement inondés. Il faut donc percevoir le changement climatique comme un accélérateur du multirisque, puisqu'il va conduire à une augmentation des risques industriels, des risques sanitaires, économiques et sociétaux.

Une accélération du multi-risques



En ce qui concerne les ressources en eau, les projections indiquent une diminution du débit moyen annuel des cours d'eau sur le bassin de la Seine entre -10 et -30 %. Une diminution de la recharge des nappes

par les précipitations qui va entraîner un rabattement du niveau de celles-ci entre 1 mètre et jusqu'à 10 mètres en Normandie.

Il y a également un problème de dégradation de la qualité de l'eau l'hiver, en lien avec une augmentation de la turbidité, et l'été, en lien cette fois-ci avec une diminution des volumes d'eau, qui dilueront moins les éléments qui se trouvent dans cette eau, ce qui entraînera des problèmes d'oxygénation et des pollutions potentielles par surconcentration d'éléments chimiques. Il faudra notamment surveiller les rejets de stations d'épuration, qui devront être recalibrées en lien avec la diminution des volumes d'eau dans les cours d'eau. Ceci sous-entend donc des problèmes de disponibilité en eau à certaines périodes, et donc des périodes d'économie et de restriction plus nombreuses et plus longues.

3. Santé

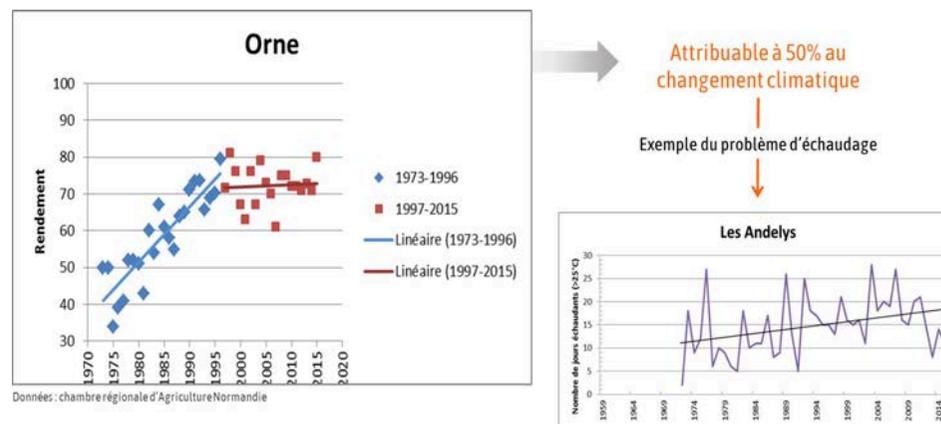
Un autre impact important concerne la santé. Les inondations vont conduire à des impacts physiques, des impacts psychologiques post-traumatiques, et des impacts sur la qualité de l'eau. Les vagues de chaleur se ressentent déjà en Normandie, puisque, si on prend l'exemple de la canicule de 2019, c'est une surmortalité de plus de 10 % par rapport à la moyenne nationale. On constate également, et ceci va aussi augmenter, les maladies cutanées, les maladies oculaires. On a aussi des insectes qui ne devraient pas être présents, comme ce moustique tigre, qui peuvent conduire à des maladies infectieuses. La pollution atmosphérique sera exacerbée par le changement climatique, avec des problèmes de surmortalité et de pathologies

chroniques, puis également la présence de plantes envahissantes avec des pollens allergisants.

4. Agriculture

Un autre exemple concerne l'évolution de l'agriculture, avec le plafonnement des rendements en blé tendre qui est déjà constaté dans l'Orne et dans l'Eure, dans le sud de la région, et qui est expliqué par la Chambre d'agriculture par le changement climatique pour moitié, avec une augmentation du stress hydrique et thermique. On illustre ci-dessous le problème de stress thermique, avec une augmentation du nombre de jours supérieurs à 25°C entre avril et juin, qui est qualifié de nombre de jours échaudants où on constate des problèmes de maturation et de remplissage des grains.

Plafonnement des rendements

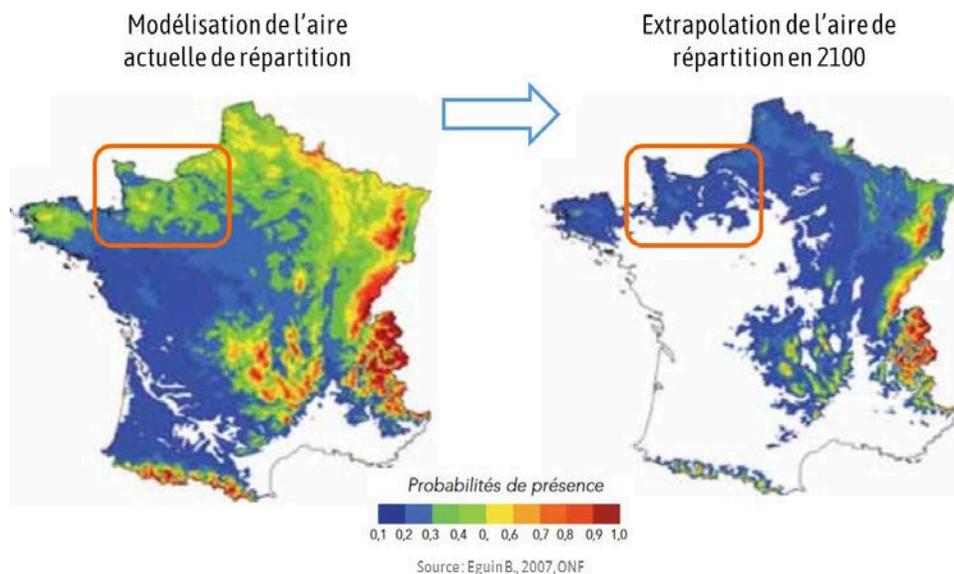


Un autre phénomène est lié aux pluies intenses, qui conduisent déjà à une dégradation des sols et à une dégradation des cultures.

5. Biodiversité

Le dernier exemple est celui des impacts sur la biodiversité. Il existe une espèce emblématique pour la Normandie qui est le hêtre. Quand on compare ces deux cartes (ci-dessous), on voit qu'à l'horizon 2100, on a une diminution du hêtre, voire même une disparition (en blanc) au sud de la région, et une probabilité d'occurrence de 30 % (en bleu) dans tout le reste de la région.

Exemple du hêtre



6. Conclusion

L'objectif du GIEC normand a été de faire un état des connaissances sur le changement climatique et ses conséquences à l'échelle de la Normandie pour sensibiliser et former les décideurs et les populations de ce territoire. Plus de 80 actions de sensibilisation ont été menées depuis 2021, et c'est plus de 10 000 personnes qui ont été touchées. L'objectif final est de faire évoluer les politiques publiques et privées pour massifier l'action pour lutter contre et s'adapter au changement climatique, et donc réfléchir collectivement pour prendre les mesures les plus appropriées pour ce territoire. Ceci suppose un projet global de territoire qui intègre les innovations, la sobriété sur l'énergie, les ressources en eau et sur toutes les ressources, et qui intègre également les risques.

A watercolor-style illustration of a wind turbine in the foreground, set against a background of rolling hills and a dense forest of evergreen trees. The color palette is muted, consisting of various shades of blue, teal, and light green.

Objectifs d'apprentissage

- ▶ Appréhender les fondements conceptuels de l'adaptation au changement climatique et de l'atténuation du changement climatique
- ▶ Découvrir plusieurs stratégies d'atténuation / d'adaptation à l'échelle de territoires
- ▶ Comprendre qu'il faut « penser global agir local »
- ▶ Appréhender les relations entre la lutte contre le changement climatique et les ODD



Ressources vidéo

Vidéos sur le portail UVED
<https://me-qr.com/l/climat2-s4>

Partie 4. Accélérer l'atténuation et l'adaptation des territoires

L'adaptation au changement climatique : une introduction

Lisa SCHIPPER

Professeure à l'université de Bonn (Allemagne)



1. Introduction

Comment réagissons-nous à la crise climatique ? Il existe deux principaux domaines d'action : stopper la source du problème, en l'occurrence atténuer les émissions de gaz à effet de serre, et s'attaquer aux impacts, ce qui signifie aider la société et les écosystèmes à s'adapter à des conditions météorologiques plus chaudes, plus humides, plus venteuses, plus variables et plus extrêmes.

L'idée de s'adapter au changement climatique était une discussion scientifique marginalisée dans les années 1990 et 2000. Maintenant, l'adaptation est étudiée dans un large éventail des sciences naturelles et sociales, ainsi que dans les sciences humaines. Partout, dans le monde, les plans et les politiques d'adaptation sont en place du niveau local au niveau national. En outre, au moins 170 pays ont inclus l'adaptation dans leur politique climatique et leur processus de planification, et de nombreuses actions prévues sont déjà mises en œuvre.

Au fur et à mesure que l'adaptation s'est propagée dans différents espaces, les connaissances à son sujet ont également explosé. Cette présentation synthétise les discussions clés sur l'adaptation dans la science, la politique et la pratique, afin de donner un aperçu des différents points de discussion, débats et thèmes qui influencent ce qui est actuellement compris comme l'adaptation au changement climatique.

2. L'adaptation dans la recherche scientifique

Avant 1992, le mot "adaptation" était rarement utilisé en relation avec le changement climatique ou les autres risques environnementaux. En effet, l'adaptation en tant que concept scientifique était largement associée à la théorie darwinienne de l'évolution et au processus de sélection naturelle et, par conséquent, au sujet des écologistes et des biologistes de l'évolution.

L'idée que les écosystèmes et les systèmes humains peuvent, dans une certaine mesure, s'adapter *ex post*, une fois que les impacts du changement climatique se font déjà sentir, est la prémisse originale sur laquelle la science de l'adaptation était fondée. Les travaux scientifiques se sont d'abord concentrés sur l'identification des seuils d'adaptation de la société et des écosystèmes afin d'identifier la flexibilité de ces systèmes.

Sur la base des expériences de gestion des risques et des enseignements tirés de la communauté humanitaire, l'idée que l'adaptation pouvait être mise en œuvre *ex ante* afin d'éviter d'être affecté est devenue très attrayante car elle suggérait que la société

pourrait faire face à encore plus de changements climatiques que la flexibilité adaptative intégrée le permettrait. Par conséquent, les chercheurs devaient également réfléchir à la façon dont cette capacité supplémentaire pourrait être créée.

3. L'adaptation en politique et en pratique

La politique et la pratique de l'adaptation sont justifiées par une croyance en l'adaptation *ex ante*. Le rapport AR6 du GIEC représente la plus récente synthèse des connaissances sur l'adaptation. Le rapport du groupe de travail II, sur les impacts, l'adaptation et la vulnérabilité, a identifié deux conclusions importantes.

1. Il y a beaucoup d'adaptation en cours dans le monde mais une grande partie de cette adaptation ne semble pas réduire les risques. Au lieu de cela, certaines d'entre elles ne font rien, et certaines d'entre elles rendent les gens plus vulnérables. Nous appelons ça la maladaptation.
2. Deux, il y a des limites à l'efficacité de l'adaptation après avoir atteint une température moyenne mondiale d'1,5°C au-dessus des niveaux préindustriels. Par exemple, après 1,5°C, nous constatons qu'il n'y aura pas assez d'eau douce disponible sur les petites îles ou les zones montagneuses qui dépendent de la fonte des glaciers pour leur eau douce.

L'adaptation occupe désormais une place centrale dans toute discussion sur le changement climatique. Elle figure en bonne place dans les politiques et les pratiques ainsi que dans la recherche à travers le monde. La communauté internationale a décidé que

l'adaptation était nécessaire, et cela a été approuvé sous la forme d'un objectif mondial sur l'adaptation dans l'article 7 de l'accord de Paris de 2015.

Étant donné que la CCNUCC et le protocole de Kyoto concernent principalement l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, l'adaptation n'était pas initialement une priorité politique. Auparavant, on craignait que l'accent mis sur l'adaptation dans les politiques détourne l'attention de l'atténuation car cette dernière est coûteuse et difficile, et nécessite des changements comportementaux importants et d'autres changements systémiques auxquels les gens résistent largement. Ainsi, on craignait vraiment que si nous commençons à dire que l'adaptation est une option, cela serait interprété comme une alternative à ne rien faire.

Bien sûr, nos efforts pour réduire les émissions n'ont pas été extrêmement fructueux jusqu'à présent, et pour cette raison, nous devons absolument nous adapter maintenant. Mais nous ne pourrions pas nous adapter si nous n'atténuons pas également. L'un des plus grands défis de l'adaptation est que la science, la politique et la pratique ne sont pas connectées de manière très cohérente. Cela signifie que nous nous posons encore de nombreuses questions sur ce qu'est l'adaptation, et cela conduit à de nombreuses confusions et frustrations quant à la pratique de l'adaptation.

4. La maladaptation

L'un des résultats malheureux de cette situation est lorsque l'adaptation se retourne contre elle-même et rend les gens plus

vulnérables plutôt que moins vulnérables. C'est ce qu'on appelle la maladaptation.

La recherche et l'expérience sur le terrain montrent qu'en dépit de bonnes intentions, de nombreuses interventions d'adaptation formelle reproduisent jusqu'à présent de vieilles erreurs et finissent par aggraver les choses en exacerbant la vulnérabilité des groupes marginalisés, qui sont des personnes déjà en difficulté en raison d'un traitement injuste dû à des facteurs tels que leur sexe, leur religion, leur origine ethnique, leurs opinions politiques ou leur statut socioéconomique.

Les exemples de mauvaise adaptation sont nombreux. Un cas aux Fidji montre que les digues construites pour protéger les gens de la montée du niveau de la mer ont en fait rendu les personnes vivant à proximité plus exposées au danger car elles finissent par empêcher le drainage des eaux pluviales. En partie, les digues et autres infrastructures donnent aux gens un faux sentiment de sécurité et les encouragent à rester dans des endroits ou à poursuivre des activités qui les rendent vulnérables au changement climatique si et quand l'infrastructure tombe en panne. Dans l'exemple étudié, les digues ont également déplacé la vulnérabilité des personnes ailleurs le long de la côte en raison des changements dans les dépôts de sédiments et ont créé des conséquences environnementales négatives en menaçant la santé de l'écosystème marin.

5. Conclusion

L'adaptation fait partie de la réponse au changement climatique. Parce que les émissions de gaz à effet de serre n'ont pas diminué ou plutôt parce que les gouvernements n'ont pas réussi à réduire les émissions de gaz à effet de serre, nous devons maintenant faire face aux impacts du changement climatique. Cela comprend l'adaptation à ces impacts, mais n'oubliez pas que nous ne pouvons pas nous adapter à tout : après avoir dépassé 1,5°C de réchauffement moyen, il y aura des limites importantes à l'efficacité de l'adaptation. Par conséquent, l'adaptation doit être considérée comme une opportunité de repenser le développement vers un développement résilient au climat qui intègre l'action climatique et le développement durable pour assurer un avenir viable et durable.

L'atténuation du changement climatique

Céline GUIVARCH

Professeure à l'École des Ponts ParisTech



Plus d'un siècle de combustion d'énergies fossiles et d'utilisation non durable des sols a entraîné un réchauffement planétaire de 1,1°C par rapport au niveau préindustriel. En l'absence de mesures d'atténuation et d'adaptation urgentes, le changement climatique menace de plus en plus les écosystèmes et les moyens de subsistance, la santé et le bien-être des générations actuelles et futures. Cette présentation porte sur l'atténuation.

1. Définition

L'atténuation est la réduction des émissions de gaz à effet de serre et le renforcement des puits (ou absorptions) de carbone. En agissant sur les causes du changement climatique, l'atténuation vise à le limiter et à en éviter les effets les plus graves.

L'état des connaissances scientifiques fait ressortir trois grands messages sur l'atténuation. Le premier est que les actions mises en œuvre sont aujourd'hui très insuffisantes. Pourtant, et c'est le deuxième message, les solutions existent. Enfin, activer ces solutions

nécessite de lever des obstacles et de penser les synergies et risques d'antagonismes avec les objectifs de développement durable.

2. Premier message

Entre 2010 et 2020, de plus en plus de politiques d'atténuation ont été mises en œuvre dans de nombreux pays et à tous les échelons de gouvernance. Par exemple, la part des émissions de gaz à effet de serre couverte par des lois climat est passée de 20 % à plus de 50 % des émissions mondiales. Nous avons donc commencé à agir et nous en mesurons les effets. Les mesures mises en place ont permis d'éviter plusieurs milliards de tonnes d'émissions de gaz à effet de serre par an. Mais les émissions mondiales ont continué à augmenter d'environ 1,3% par an. Ces émissions de gaz à effet de serre, dont l'accumulation dans notre atmosphère cause le changement climatique, atteignent 59 milliards de tonnes de CO₂ équivalent. Or, pour se placer sur une trajectoire compatible avec la limitation du réchauffement global à 2°C, les émissions mondiales doivent être réduites de 20 à 30 % d'ici 2030 par rapport à leur niveau de 2019. Pour 1,5°C, c'est une division par deux.

Quel que soit le niveau de stabilisation du réchauffement global visé, il faut atteindre zéro émission nette de CO₂, que l'on appelle aussi la neutralité CO₂, et une baisse des autres gaz à effet de serre, méthane, protoxyde d'azote, gaz fluoré. Dans les trajectoires compatibles avec 1,5°C, la neutralité CO₂ est atteinte vers 2050 ; pour 2°C, c'est vers 2070.

3. Deuxième message

Ces trajectoires impliquent, par leur ampleur, des transformations inédites de tous les systèmes : les systèmes énergétiques, les systèmes d'usage des sols et alimentaires, les systèmes industriels, les infrastructures de transport, les bâtiments et les villes. Si les transformations nécessaires sont majeures, un des messages du rapport du GIEC sur l'atténuation est que nous disposons aujourd'hui des solutions. Plus précisément, le rapport montre qu'il existe des options de réduction des émissions dont le coût est inférieur à 100 dollars la tonne de CO₂, et qui, cumulées, pourraient réduire les émissions mondiales de moitié d'ici 2030. Voici les principales :

- les technologies de production d'électricité renouvelable : le solaire, l'éolien, le nucléaire,
- la réduction des fuites de méthane et de gaz fluoré,
- le stockage de carbone dans les sols agricoles,
- la restauration des écosystèmes et des forêts,
- le changement des régimes alimentaires vers des régimes moins carnés,
- la sobriété et l'efficacité énergétiques dans les bâtiments,
- le développement des transports en commun et des mobilités dites actives : le vélo et la marche,
- l'électrification des véhicules,
- l'efficacité énergétique et l'efficacité matière,
- l'électrification des procédés dans l'industrie.

Dans la dernière décennie, ce qui a beaucoup changé est le coût d'un certain nombre de ces options de réduction des émissions : ils ont fortement diminué à mesure que ces options ont été déployées. Par exemple, le coût du solaire a été divisé par dix en dix ans. Ainsi, le coût de la production d'électricité renouvelable est devenu compétitif avec les énergies fossiles dans beaucoup d'endroits du monde.

4. Troisième message

Il est désormais établi qu'au niveau macro-économique, agir pour limiter l'ampleur du changement climatique nous coûtera moins cher que d'en subir les dommages. Pour autant, les transformations majeures requises ne pourront se faire sans un effort volontariste ni sans lever un certain nombre d'obstacles.

Certains obstacles sont liés à l'organisation matérielle de notre appareil productif. Par exemple, si les infrastructures déjà existantes dont l'utilisation demande des énergies fossiles (ex : centrales électriques à charbon, gaz fossile ou pétrole, installations industrielles, véhicules thermiques, etc.) étaient utilisées jusqu'à la fin de leur durée de vie technique, cela saturerait le budget d'émissions correspondant à un réchauffement de 1,5°C du globe. Cela veut dire que tout investissement supplémentaire dans des infrastructures utilisant du charbon, pétrole ou gaz contribuerait à dépasser ce budget ou à créer ce qu'on appelle des actifs échoués, c'est-à-dire des actifs qu'il faudra abandonner avant la fin de leur durée de vie.

D'autres obstacles sont d'ordre financier. Les investissements observés vont encore massivement vers les énergies fossiles, et ceux

pour l'atténuation sont inférieurs d'un facteur trois à six, selon les secteurs et régions, aux investissements qui seraient nécessaires. Mais pour autant, l'analyse montre qu'il y a suffisamment de capitaux, d'épargne mondiale disponible pour combler cet écart. Il s'agit donc de réorienter les investissements vers les solutions d'atténuation.

D'autres obstacles sont d'ordre institutionnel. L'ampleur des transformations à mettre en œuvre nécessite en effet des mesures ambitieuses et coordonnées entre tous les échelons de gouvernance, depuis les territoires, régions, pays jusqu'à l'Europe et l'international, et ce dans un monde extrêmement inégal. À l'échelle mondiale, les 10% les plus riches émettent 40% des émissions environ, tandis que 50% des plus pauvres représentent moins de 15% des émissions. Il s'agit d'organiser la solidarité face au changement climatique. Ça passe par exemple par les transferts de technologies et le financement international des actions de réduction des émissions et d'adaptation.

Pour contribuer à lever les obstacles à l'atténuation, les actions peuvent s'appuyer sur des synergies avec d'autres Objectifs de développement durable, comme l'éradication de la pauvreté, l'amélioration de la santé, de l'éducation, la réduction des inégalités, la protection de la biodiversité. Sur la santé, par exemple, les synergies sont multiples : par exemple, adopter des régimes alimentaires moins carnés et bons pour la santé réduit les émissions de méthane.

Mais l'atténuation peut à l'inverse faire peser des risques pour certains enjeux de développement. Par exemple, une stratégie d'atténuation qui reposerait sur le développement à très large échelle de biomasse énergie aurait des conséquences très néfastes sur la biodiversité. Pour

éviter ces risques, la façon dont l'atténuation sera mise en œuvre comptera beaucoup.

De manière générale, on sait qu'agir sur les demandes d'énergie, de matériaux, de biens pour modérer la consommation de ressources à l'échelle mondiale, cette action sur les demandes permet de réduire les risques. La conception des politiques climatiques compte également beaucoup. Par exemple, on sait que les conséquences sociales d'une fiscalité sur le carbone dépendent surtout de l'utilisation que l'État fait des revenus générés par cette fiscalité.

5. Conclusion

Il est urgent d'agir pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Chaque délai à agir se traduit en menace croissante pour l'humanité. Mais les solutions de réduction des émissions sont connues. Nous avons les moyens de les mettre en œuvre tout en assurant le bien-être de tous, à condition de suivre des démarches de transition justes, c'est-à-dire qui prennent en compte la question des inégalités dès la conception des politiques d'atténuation et qui visent à permettre à tous de trouver leur place dans un futur monde bas carbone.

L'atténuation par la demande du changement climatique



Céline GUIVARCH
Professeure à l'École des Ponts ParisTech

Les actions d'atténuation portant sur les demandes d'énergie, de matériaux, de biens, de terres offrent un potentiel important pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Ce potentiel est évalué à 40 à 70 % de réduction d'émissions à l'horizon 2050 dans le dernier rapport du GIEC. Mais de quoi parle-t-on exactement, lorsque l'on parle d'actions portant sur les demandes ?

1. Exemples

Voici quelques exemples :

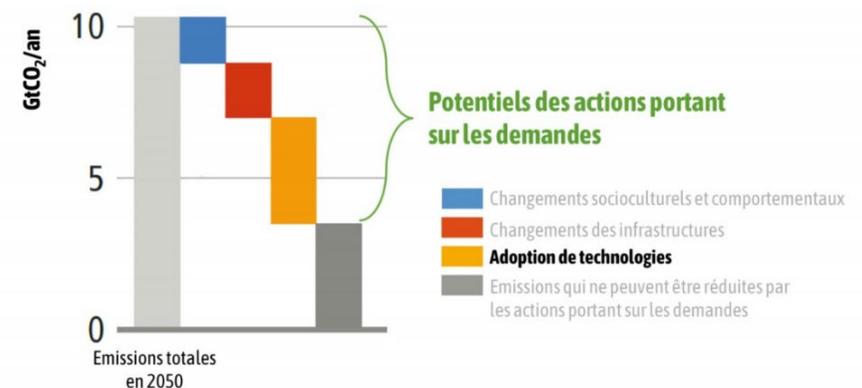
- Se déplacer avec des véhicules plus légers qui demandent moins de matériaux pour les fabriquer et moins d'énergie pour les faire avancer.
- Isoler les bâtiments pour qu'il y fasse une température agréable sans avoir besoin de dépenser beaucoup d'énergie pour les chauffer ou les rafraîchir.
- Adopter des régimes alimentaires moins carnés qui réduisent les émissions de méthane dues à l'élevage.

Les actions portant sur les demandes peuvent donc être de natures assez diverses, depuis l'adoption de technologies jusqu'à des changements des infrastructures et de leur utilisation, et des changements socioculturels et comportementaux.

2. Le cas du bâtiment

Concernant les bâtiments, le rapport du GIEC évalue le potentiel de réduction des émissions à l'horizon 2050 à environ sept milliards de tonnes de CO₂ équivalent. Vous avez en jaune, sur le graphique ci-dessous, la partie qui vient de l'adoption de technologies : équipements électroménagers efficaces, installations renouvelables, bâtiments à basse consommation énergétique. Vous avez en rouge la partie qui vient de transformations des infrastructures, de l'aménagement urbain pour des villes plus compactes, avec des espaces verts, de diminution des surfaces neuves construites. Enfin, vous avez en bleu les comportements et pratiques favorisant les économies d'énergie, par exemple se chauffer à 19°C au lieu de 20°C.

Exemple du secteur des bâtiments



Source : adapté de AR6/WG3 (2022)

3. La sobriété

Parmi les actions portant sur les demandes, certaines reposent sur la sobriété. Ce levier est important. Le résumé à l'intention des décideurs du GIEC en donne une définition approuvée par l'ensemble des États du monde. Il s'agit de « *l'ensemble des politiques, mesures et pratiques quotidiennes qui permettent d'éviter des demandes d'énergie, de matériaux, de terres et d'eau, tout en assurant le bien-être de tous les êtres humains dans les limites planétaires* ». Pour reprendre des exemples que j'ai donnés dans le secteur des bâtiments, la sobriété consiste par exemple à se chauffer à 19°C au lieu de 20°C ou diminuer les surfaces neuves construites.

4. Le cadre « Éviter, remplacer, améliorer »

Une façon d'analyser les actions d'atténuation est de les classer dans le cadre "éviter, remplacer, améliorer" : éviter les demandes, remplacer des demandes par des solutions moins émettrices de gaz à effet de serre, améliorer les systèmes de fourniture de services.

Par exemple, dans le secteur des transports, cela donnerait :

- éviter les déplacements de personnes et de marchandises avec un urbanisme raccourcissant les distances entre domicile, travail, école, commerces, et en raccourcissant les chaînes logistiques,
- remplacer les modes de transport les plus émetteurs (avion, voiture), par des modes peu émetteurs (rail, transports en commun), ou pas émetteurs (vélo et marche),

- améliorer les véhicules pour qu'ils soient légers et électrifiés.

5. A l'échelle individuelle

Si on regarde l'échelle individuelle, de nombreuses actions peuvent réduire les émissions de gaz à effet de serre. Elles dépendent bien évidemment des personnes et des contextes, mais d'une façon générale, les actions avec les plus grands potentiels de réduction des empreintes carbone sont dans la catégorie "éviter" : ne pas posséder de voiture et éviter des voyages en avion. Dans la catégorie "remplacer" : se déplacer en transport en commun, à vélo, en marchant plutôt qu'en voiture et passer à des régimes alimentaires sans viande. Et dans la catégorie "améliorer" : utiliser un véhicule électrique, isoler les bâtiments, y installer panneaux solaires et pompes à chaleur.

Les actions individuelles ne se limitent pas aux choix de consommation. Elles passent aussi par les choix en tant que professionnels, en tant qu'investisseurs et en tant que citoyens. Les possibilités d'action dépendent des personnes et des contextes. Les potentiels d'atténuation diffèrent beaucoup d'une région à l'autre et à l'intérieur d'une même région. Certaines populations ont besoin d'énergie et de ressources supplémentaires pour assurer leur bien-être et leurs besoins de base en matière de logement, de mobilité et de nutrition.

Pour autant, l'état des connaissances montre que l'éradication de l'extrême pauvreté et l'accès à un niveau de vie décent pour tous ne conduiraient pas à un accroissement significatif des émissions mondiales. En effet, les demandes d'énergie associées sont très faibles au regard de la demande énergétique mondiale. Il est possible de

fournir de meilleurs services avec une faible consommation d'énergie et de ressources.

De l'autre côté, les personnes ayant un statut socio-économique élevé contribuent de manière disproportionnée aux émissions et possèdent aussi un potentiel élevé de réduction de ces émissions.

6. Une responsabilité collective

Il est important de souligner que les actions sur les demandes ne sont pas la seule responsabilité des consommateurs. Au contraire, elles nécessitent des actions collectives et des politiques publiques pour transformer les normes sociales et les infrastructures. Par exemple, la construction de pistes cyclables sécurisées est nécessaire pour faire de la pratique du vélo une norme.

L'atténuation implique plusieurs types d'acteurs sociaux :

- les individus par leur choix de consommation et leurs habitudes,
- les collectifs porteurs de mouvements sociaux, de valeurs,
- les entreprises qui investissent et influencent les choix par la publicité, par exemple,
- les institutions qui définissent les réglementations, les politiques publiques.

Les acteurs contribuent soit au statu quo de la consommation mondiale à forte intensité carbone, soit aux transformations vers une faible intensité carbone. Les changements systémiques et majeurs dont on parle nécessitent une action de tous ces acteurs pour changer l'espace des possibles. Les choix des individus et des communautés

sont inspirés par des modèles, des normes sociales changeantes guidés par des politiques et des mouvements sociaux. Ils nécessitent également une offre et des infrastructures appropriées, et les investissements correspondants pour construire et permettre l'accès aux alternatives décarbonées pour tous.

7. Les co-bénéfices de l'atténuation par la demande

Un point important est que beaucoup des stratégies d'action qui portent sur les demandes ont des co-bénéfices. Au-delà de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, ils apportent par exemple des bénéfices en matière de qualité de vie et de santé. Par exemple, le passage aux mobilités actives et aux transports publics améliore la qualité de l'air et la santé. De même, réduire le gaspillage alimentaire et favoriser les régimes alimentaires moins carnés améliore la sécurité alimentaire et la santé, et réduit les pressions sur les ressources en eau, la biodiversité et les écosystèmes.

8. Conclusion

Les actions d'atténuation portant sur les demandes offrent un potentiel important pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, et présentent des bénéfices pour la qualité de vie et la santé. Cependant, mobiliser ce potentiel nécessite des changements socioculturels et des politiques publiques pour garantir une transition juste et équitable.

Territoires urbains et changement climatique

Daniel COMPAGNON
Professeur à Sciences Po Bordeaux



1. Urbanisation et émissions de gaz à effet de serre

Les villes représentent une part prépondérante des sources d'émissions de gaz à effet de serre. On cite souvent le chiffre de 70 % des émissions, mais cela dépend aussi de la définition qu'on a des villes et elle varie d'un pays à l'autre, principalement parce que les villes concentrent la majorité de la population et aussi une part significative des activités industrielles, même si cela varie d'une ville à l'autre.

La tendance plus que séculaire à l'urbanisation et la croissance de la taille des grandes villes ne se dément pas dans les pays occidentaux. Elle est aussi prononcée dans les pays en développement, en particulier ceux qu'on dit émergents : la Chine, l'Inde, le Brésil. Les espaces urbanisés seront donc au cœur des enjeux du changement climatique d'ici la fin du siècle. Pour la suite de ce propos, je m'appuierai surtout sur des exemples en Nouvelle-Aquitaine.

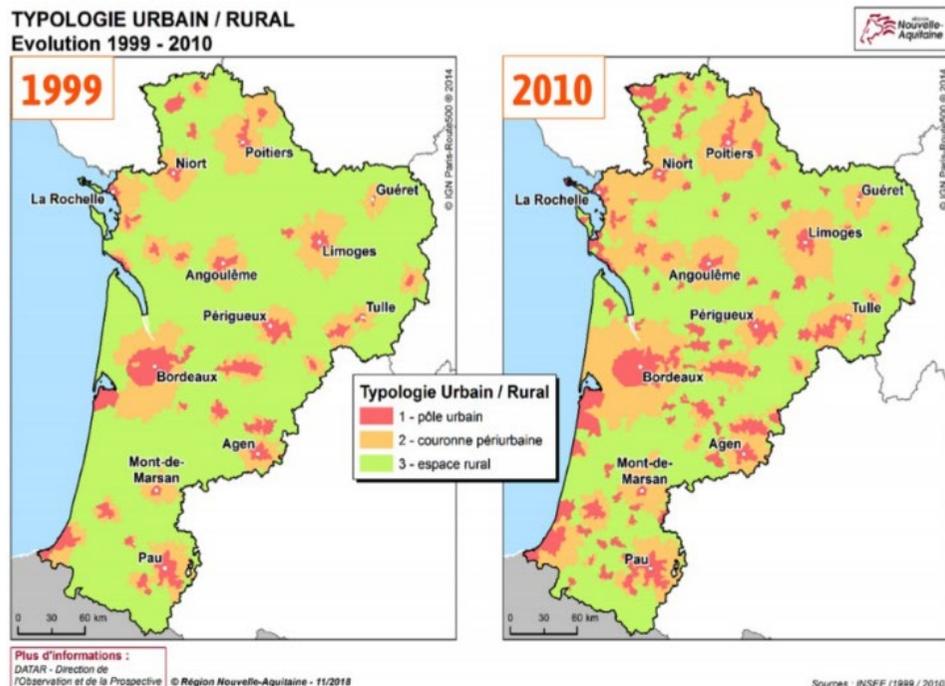
Une grande partie des défis posés par le réchauffement climatique à l'espace urbain et des solutions avancées pour y répondre ne sont pas

fondamentalement nouveaux : pensons aux transports en commun, à la nature en ville, à la gestion de l'eau, aux écoquartiers. Ils ont été cadrés depuis longtemps déjà dans la perspective de la ville durable, dans le sillage des Agendas 21 et de la Conférence de Rio en 1992. Mais le changement climatique nous oblige à changer d'échelle en termes d'ampleur des transformations à opérer et en termes d'accélération de la cadence. Il faut faire jouer à la ville un rôle prépondérant dans l'atténuation et la préparer à s'adapter aux impacts déjà sensibles du changement climatique.

2. La forme des villes

La 1^{re} source d'émissions dans les villes est, comme ailleurs, la consommation d'énergie pour le chauffage, pour le déplacement, pour la production. Cependant, le facteur qui pèse le plus sur la propension des villes à émettre plus ou moins de gaz à effet de serre est la morphologie urbaine, la façon dont la ville s'organise, en particulier le phénomène de l'étalement urbain par l'extension des zones périphériques, comme le montre la carte ci-dessous produite par la data en Nouvelle-Aquitaine.

Cette urbanisation en taches est une tendance déjà ancienne en France, décriée pour la consommation d'espaces naturels et agricoles qu'elle engendre, ce qu'on appelle ici l'artificialisation des sols, mais qui est aussi une source d'émissions supplémentaires de gaz à effet de serre, en allongeant les déplacements domicile-travail ou pour les achats, ou encore les boucles de logistique, ou bien du fait des infrastructures minérales qu'il faut construire.



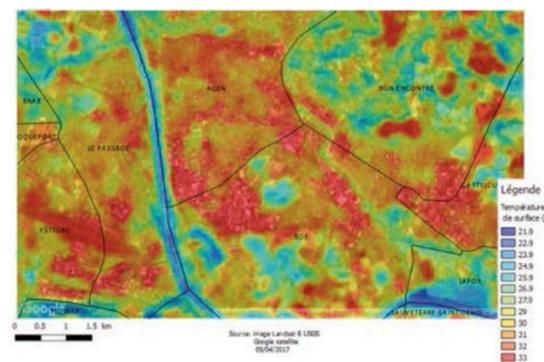
L'étalement urbain a des causes économiques : le prix, la disponibilité du foncier pour se loger, le niveau des impôts locaux dans les villes-centres, mais aussi sociales avec la gentrification des centres-villes, la recherche d'aménités environnementales par les classes moyennes qui s'exilent dans les périphéries. Ces tendances lourdes le rendent difficilement maîtrisable avec les instruments ordinaires de l'action publique. Ça se traduit aussi par une injonction à redensifier la ville en urbanisant les dents creuses, en densifiant l'occupation des parcelles privées, conjuguée avec le refus de construire en hauteur, comme c'est le cas à Bordeaux Métropole, dans la plupart des communes.

3. Le risque d'îlot de chaleur

Cette redensification s'opère au détriment des anciens jardins et des espaces végétalisés.

Or, ces espaces jouent un rôle important pour réduire l'impact des canicules, tout en maintenant une certaine biodiversité en ville. En effet, l'un des impacts les plus directement sensibles du changement climatique est le phénomène des îlots de chaleur urbains, quand une vague de chaleur sévit plusieurs jours de suite. Les cartes thermiques colorisées publiées dans le rapport AcclimaTerra 2018 montrent que le phénomène n'épargne pas les petites villes, comme c'est le cas à Agen, en Lot-et-Garonne. Sur la carte ci-dessous, vous voyez par exemple qu'il y a un différentiel de dix degrés dans cette mesure effectuée en août 2016 entre les zones périphériques humides et le centre le plus minéral de la ville.

Atténuer le phénomène d'îlot de chaleur



Détection des îlots de chaleur et de fraîcheur le 12 août 2016 sur Agen et son agglomération

Source : Rapport Acclimaterra, 2018

Dans ce contexte, les jardins précités font une réelle différence avec les surfaces minérales, mais un bois de pins maritimes au centre de Mérignac, après quelques jours de canicule, restitue autant de chaleur

que le parking en béton du centre commercial voisin. C'est dire si le type de végétation et son taux d'humidité comptent énormément.

Or, la capacité des villes à maintenir une végétation humide, donc arrosée, sera directement subordonnée aux arbitrages futurs concernant l'usage de l'eau, dont la disponibilité est déjà problématique par endroits.

Il convient de noter que l'isolation thermique des bâtiments, enjeu de limitation de la consommation d'énergie pour le chauffage en hiver, est également un enjeu de climatisation naturelle en été. Certains logements neufs récents, dans ce qui est présenté comme des écoquartiers, n'ont été conçus que pour le confort d'hiver et se transforment en serre invivable en été. Le recours alors à la climatisation artificielle, source de consommation d'énergie accrue, est un échec évident d'adaptation.

4. Le risque de submersion et d'inondation

Un autre impact majeur du changement climatique dans beaucoup de villes construites au bord de côte ou d'estuaire, en France et à travers le monde, est lié à la montée du niveau des océans combinée à l'intensité croissante des événements météorologiques extrêmes. La concomitance des vagues de submersion marine et des inondations pluviales de l'amont suscitera des phénomènes fluvio-marins potentiellement destructeurs jusque très loin dans les terres.

En France, ils demeurent mal anticipés dans les plans de gestion des risques et des documents d'urbanisme. À Bordeaux, l'urbanisation des bords de Garonne encore en friche dans le projet Euratlantique ne

prend pas suffisamment la mesure de ce phénomène à long terme. Aux Pays-Bas, au contraire, où il y a une culture de la submersion marine, un port comme Rotterdam a une stratégie sophistiquée pour lutter contre ce risque.

5. Le transport

Centrale dans la problématique des transports, la réduction programmée de l'usage de l'automobile en ville doit être un pilier des politiques d'atténuation, en œuvrant en même temps à la reconquête de l'espace public pour y faire autre chose que circuler et stationner des voitures toujours plus nombreuses. Il faut, en réalité, réserver l'automobile aux déplacements dans l'espace rural peu dense sur des distances moyennes.

Les actions publiques allant dans le sens de cette réduction de la place de l'automobile sont anciennes, mais peu efficaces. L'accroissement de l'offre de transports en commun n'entraîne pas de report modal massif. L'accroissement réel de l'usage du vélo n'a guère eu d'impact sur la circulation automobile.

Malgré l'urgence climatique connue, les initiatives pour réduire la place de l'automobile suscitent la polémique. Un peu partout en France, des projets de zones à faibles émissions, d'abord conçues pour lutter contre la pollution atmosphérique, suscitent des réactions disproportionnées, alors qu'à Bordeaux, seuls 8 % des véhicules seraient définitivement exclus de la ZFE.

Il y a donc un devoir de pédagogie politique mal assumé par les élus, comme en témoignent des projets de voies nouvelles sur les rocades

ou le fantasme du grand contournement autoroutier à Bordeaux. Il ne sert à rien, semble-t-il, que toutes les études techniques aient prouvé qu'un tel équipement, coûteux et destructeur d'espaces naturels et agricoles, n'aurait pas d'impact significatif sur l'encombrement de la rocade bordelaise plusieurs heures par jour encombrement majoritairement imputable au trafic intra-agglomérations.

6. Gouvernance

Les politiques publiques à mettre en œuvre, en particulier dans les grandes villes, soulèvent des questions de gouvernance complexes. Une partie des compétences restent à la commune, d'autres sont mutualisées à l'échelle de la communauté d'agglomération, par exemple le PLUi, ou bien appartiennent aux Départements, pour les routes, pour l'essentiel, ou à la Région, pour la politique énergétique et l'aménagement du rail. Les enjeux d'aménagement et de transports en général dépassent l'échelle de l'agglomération ainsi que ceux de l'alimentation en eau ou la prévention des risques fluvio-marins qui se gèrent à l'échelle d'un estuaire.

Or, les collectivités de différentes échelles ne coopèrent pas facilement entre elles ni avec l'État, et les projets structurants, par exemple le RER métropolitain, se mettent en place à un rythme trop lent. Trop souvent, l'action publique locale se réfugie dans des projets symboliques, plantations d'arbres, ou des mesures fragmentaires, par exemple le nombre de kilomètres de pistes cyclables. À cet égard, le contenu des Plans climat-air-énergie territoriaux, PCAET, sont souvent décevants et devraient s'inscrire davantage dans une vision stratégique à plus long terme.

Les territoires agricoles en polyculture élevage et le changement climatique



Marie-Pierre ELLIES
Professeure à Bordeaux Sciences Agro

Le changement climatique et la dégradation de l'environnement constituent une menace existentielle pour l'Europe et le reste du monde. Pour y faire face, l'Europe a besoin d'une nouvelle stratégie de croissance qui transforme l'Union en une économie moderne, compétitive et efficace dans l'utilisation des ressources.

1. Intérêts de la polyculture élevage

La polyculture élevage, qui était un mode de production jadis très répandu, a régressé depuis 50 ans, en France, au profit d'une agriculture spécialisée, associée à l'apparition de techniques plus productives. Mais face, notamment, aux aléas climatiques et économiques, qui sont de plus en plus présents, et à une prise de conscience générale, les systèmes ont besoin d'être repensés, pour les rendre plus durables. Dans ce contexte, il est nécessaire d'explorer d'autres modes de production et de réfléchir à des alternatives à l'agriculture intensive, qui est basée sur l'artificialisation des cultures par l'usage d'intrants de synthèse et d'énergies fossiles.

La polyculture élevage est donc de plus en plus reconnue au plan international comme capable de répondre à ces attentes. En effet, la complémentarité des cultures et de l'élevage permet d'optimiser le fonctionnement de l'exploitation, grâce à un meilleur bouclage des cycles et à une diversité de productions, animales et végétales, qui induit une moindre dépendance aux intrants. Il semble donc très important de remettre au goût du jour ce système, autrefois traditionnel, qui se pose aujourd'hui comme un modèle agricole durable et une des voies vers la transition agroécologique.

Par contre, il n'existe pas de modèle type, en agroécologie. Il faut travailler sur des principes, qu'il faut ensuite décliner dans des situations concrètes, en fonction des contextes locaux.

2. A l'échelle des exploitations



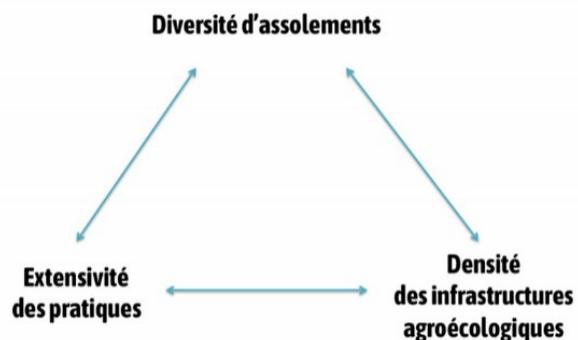
D'après Jouven, Agro Smart Campus, 2021

À l'échelle des exploitations d'élevage, ces principes, que vous voyez représentés sur la figure, sont au nombre de cinq. De nombreuses pratiques d'adaptation sont déjà en place, au niveau des exploitations, et elles font écho à ces cinq principes, notamment la valorisation du sainfoin ou de la chicorée comme plantes bioactives pour protéger les troupeaux des pathogènes, la valorisation du son, ou d'autres sous-produits de l'alimentation humaine, pour l'alimentation animale, l'adaptation des animaux à des aliments de moindre qualité, la recherche de la complémentarité entre les productions végétales et animales, la conception de systèmes plus résilients, susceptibles de s'adapter aux perturbations biophysiques, mais également la valorisation des pratiques permettant de préserver la biodiversité, à l'échelle des exploitations comme à l'échelle des territoires.

Si le changement de paradigme, on le voit, est déjà opéré dans la plupart des élevages, il est important, toutefois, de considérer que les enjeux écologiques et environnementaux dépassent le cadre de l'exploitation, et qu'il est donc nécessaire de passer du système d'élevage à quelque chose de plus large, qui peut être le système alimentaire, qu'il soit territorialisé ou pas.

3. A l'échelle du territoire

À l'échelle du territoire, les pratiques agricoles impactent de façon significative l'évolution des paysages et la biodiversité qu'ils abritent. Ces agricultures, diversifiées, basées sur une utilisation durable des ressources naturelles, contribuent ainsi à l'atténuation des impacts du changement climatique.



Source : UVED, 2023

Ces exploitations reposent fréquemment sur trois piliers qui interagissent entre eux : la diversité des assolements, l'extensivité des pratiques, et la densité des infrastructures agroécologiques. Ainsi, la diversité d'occupation du sol génère une diversité de milieux et de ressources. Cette biodiversité ne peut être riche que si elle n'est pas contrainte par une trop forte utilisation d'intrants chimiques, permise par une rotation longue ou encore la présence de légumineuses. La présence d'infrastructures agroécologiques, telles que les haies, les mares ou encore les prairies humides, vient encore accroître la diversité du milieu et son bon fonctionnement écologique. Les agriculteurs sont donc gagnants, au travers d'une régulation biologique et d'une pollinisation renforcée. Outre leur impact sur la qualité des paysages, l'adaptation des exploitations vers davantage de diversité d'assolements, vers l'extensification des pratiques, ou encore le maintien d'infrastructures agroécologiques, permet d'atténuer leur impact sur l'environnement, et ainsi de limiter leur influence sur le changement climatique.

Ces aménités positives de l'élevage permettent de qualifier des zones agricoles que l'on appelle "à haute valeur naturelle", ou "HVN". Aujourd'hui, ces zones agricoles sont essentiellement des zones de polyculture élevage correspondant à des systèmes agricoles relativement homogènes, qui sont liés à des terroirs, à des pratiques, à des races animales, mais également à des produits identifiés et généralement valorisés sous des signes officiels de qualité. Les pratiques mises en œuvre dans ces territoires permettent à la fois de retenir davantage l'eau dans les sols, mais également de réduire l'utilisation de cette ressource, dont la gestion est amenée à être de plus en plus sensible, via la valorisation d'animaux plus rustiques, plus efficaces et plus adaptés aux conditions imposées par le changement climatique.

4. Exemple du projet Maraîchine

C'est avec cette nécessité de protéger l'environnement, dans un contexte où les enjeux agroécologiques sont très forts, que le projet Maraîchine est né dans les prairies humides du littoral atlantique. Dans cet environnement contraignant, où la race Maraîchine était en danger et nécessitait un programme de préservation, l'idée que les éleveurs constituent un maillon indispensable pour gérer le marais est devenue une évidence. Or, l'élevage, qui était, à cette époque-là, allaitant et peu intensif, existait bien, historiquement, sur ce territoire, et il était basé sur une race, donc la race Maraîchine, dont on pensait qu'elle avait disparu. Cette race locale, adaptée et ajustée à son environnement, du fait de sa rusticité, s'accordait sur les principes de l'agroécologie en élevage, et

rencontrait les aspirations des citoyens pour une agriculture qui produit en privilégiant les biens et les services environnementaux.

Le programme de développement de la Maraîchine alliait la conservation de la race à la conservation de son environnement traditionnel de prairies humides du littoral atlantique. La sélection a été orientée sur des vaches rustiques, permettant des méthodes d'élevage extensives qui respectent le fonctionnement écologique et hydrologique des prairies humides. Le caractère rustique a ainsi été privilégié sur la conformation de l'animal, aboutissant à une race qui avait une grande taille, qui était facile à élever, notamment grâce à un vêlage sans assistance, qui présentait également une bonne résistance aux maladies et une bonne production laitière, associée à des bonnes capacités maternelles. En parallèle, de nombreux agriculteurs reconnaissent la spécificité de cette race pour la gestion du marais, et beaucoup mettent en avant la capacité de cette race à utiliser des fourrages grossiers, à faible valeur nutritive, issus de ces zones humides.

Les perceptions restent toutefois un peu contrastées en ce qui concerne l'attention portée à la biodiversité, l'alimentation des animaux, ou encore la commercialisation. Aussi, même si le changement est en marche et que cela peut paraître simple, on peut tout de même noter l'existence de verrous psychosociaux et techniques, et une certaine complexité pour opérer tous ces changements.

5. Conclusion

Le cadre de l'agroécologie est un cadre intéressant pour penser l'évolution des filières vers plus de durabilité, mais la mobilisation de ce cadre va nécessiter une réflexion au sein des filières, pour accompagner le changement, pour gérer les tensions entre les piliers, les échelles ou encore les acteurs, pour gérer les échelles de temps, qui ne sont pas forcément les mêmes entre les différents acteurs, pour trouver et lever les verrous, qui ne sont pas non plus les mêmes, pour accompagner la montée en gamme des produits, et pour adapter, en parallèle, les systèmes alimentaires aux nouvelles contraintes et aux nouvelles attentes, via notamment une moindre consommation des produits animaux, compensée par une orientation des achats vers des produits de meilleure qualité. Tout ceci nécessite d'apprendre à innover, de manière collective inter et intra-filière.

La montagne touristique face au changement climatique

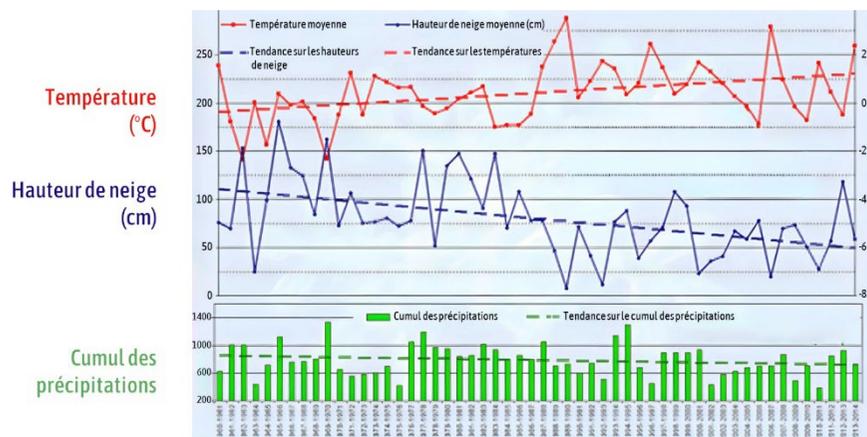


Emmanuelle GEORGE
Chercheuse à l'INRAE

1. Changement climatique et enneigement en montagne

Les montagnes, qui couvrent 27% du territoire national français, sont aujourd'hui considérées comme des marqueurs du changement climatique.

Exemple du Col de Porte (Alpes) – Période 1961-2014



Source : Météo France

Ainsi, sur cette figure, on observe les enregistrements réalisés par Météo France sur une période de 50 ans au Col de Porte, à 1 326 m d'altitude, dans les Alpes françaises, pour trois variables : la température, la hauteur de neige et les précipitations. Les effets du changement climatique sont bien réels, avec une hausse de température d'un peu plus de 1°C, une baisse de la hauteur de neige d'environ 50 cm, et une grande variabilité dans les précipitations, sans tendance significative cependant.

Ce constat va tout à fait dans le sens des récents travaux du GIEC, qui montrent qu'à horizon 2040-2050, la dégradation des conditions d'enneigement en montagne sera effective et ce, quel que soit le scénario climatique suivi.

2. L'activité « ski »

Ces évolutions concernent particulièrement la montagne dite touristique, c'est-à-dire celle qui a été aménagée, progressivement dès la fin du XIX^e, début XX^e siècle, puis de manière intensive dans les années 1960-1970, avec une forte volonté de l'État pour créer des stations et une vraie économie des sports d'hiver. Ces stations étaient pensées, développées et organisées autour de la pratique du ski alpin pour accueillir en séjour des touristes. Elles ont permis de développer l'activité économique pour les territoires de montagne, aux côtés de l'agriculture, du pastoralisme ou de la forêt, mais aussi de maintenir de la population dans ces espaces.

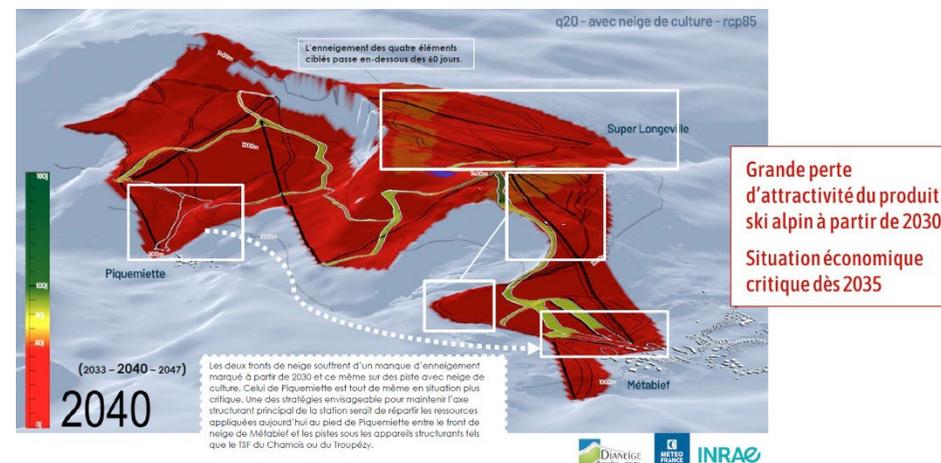
Aujourd'hui, on évalue à 250 le nombre de stations, réparties sur l'ensemble des massifs français métropolitains. C'est dans le massif des Alpes que se concentrent l'essentiel de ces stations. Ces stations sont synonymes d'emplois, estimés à 120 000 en lien avec l'activité des remontées mécaniques.

3. Problématique

Après plus d'un siècle d'aménagements touristiques, l'activité des stations est fortement questionnée par le changement global, notamment le changement climatique. En effet, les stations sont météo-dépendantes. Dit autrement, la présence de neige sur le domaine skiable est un facteur d'attractivité pour les touristes skieurs.

Dans ce cadre du changement climatique, les travaux de recherche menés conjointement par INRAE et Météo France ont montré la dégradation des conditions d'enneigement sur les domaines skiables, une dégradation comparable quel que soit le scénario climatique d'ici à 2050, mais une dégradation dont l'intensité va dépendre ensuite du scénario climatique suivi à l'échelle planétaire jusqu'à la fin du siècle. En pratique, certaines stations, à l'image de Métabief dans le Jura, anticipent l'arrêt de l'exploitation de leur domaine skiable d'ici 20 à 30 ans. Face à ces éléments, les stations et les territoires qui dépendent de cette économie ont engagé des stratégies d'adaptation. En risquant la caricature, ces stratégies sont au nombre de deux.

Exemple de la station de Métabief (Jura)



4. Stratégie d'adaptation 1 : la neige artificielle

La première stratégie, initiée dans les années 1980 et largement déployée depuis, vise à assurer l'exploitation du domaine skiable et donc à garantir les conditions d'enneigement. Pour ce faire, on produit ce qu'on appelle de la neige artificielle ou neige de culture. Il s'agit, en pratique, d'envoyer de l'eau sous pression dans des enneigeurs, ces longues perches qu'on voit sur le bord de la piste sur la photo. L'enjeu est de pallier le manque de neige naturelle et ainsi de permettre l'exploitation du domaine skiable aux périodes particulièrement importantes en station, à savoir Noël et les vacances scolaires des mois de février-mars en France.

Aujourd'hui, environ 35 % des domaines skiables sont couverts en neige de culture et la plupart des stations, grandes ou moyennes, ont des projets d'équipement en neige de culture. Cette dynamique peut

être encouragée et soutenue financièrement par les pouvoirs publics, notamment les Régions ou les Départements.

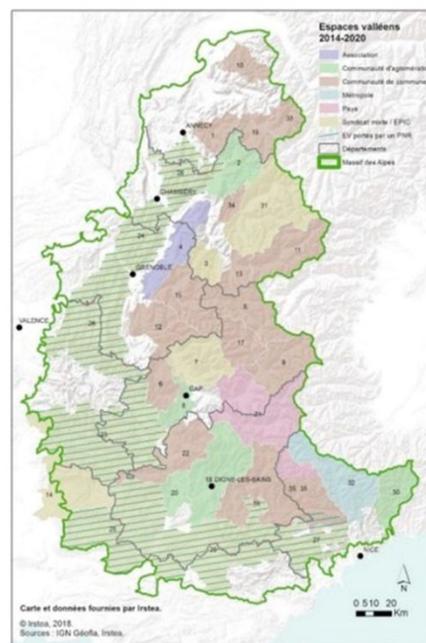
Cette stratégie d'adaptation au changement climatique est cependant de plus en plus critiquée par les associations de protection de l'environnement mais également par les citoyens, comme en témoigne l'installation récente d'une ZAD, zone à défendre, à La Clusaz, en Haute-Savoie, destinée à éviter la création d'une retenue d'altitude. Ce qui est en débat avec l'enneigement artificiel, c'est surtout l'impact sur la ressource en eau. Il faut 1 m³ d'eau pour produire 2 m³ de neige et beaucoup de stations ont créé ce qu'on nomme des retenues d'altitude, c'est-à-dire des sortes de bassins artificiels destinés à fournir l'eau nécessaire pour la production de neige. Au-delà de la pression sur les ressources, les opposants au projet mettent surtout en avant des valeurs de durabilité, en considérant cette stratégie comme une maladaptation face au changement climatique.

5. Stratégie d'adaptation 2: la diversification touristique

Souvent présentée comme liée au changement climatique, cette diversification est aussi à mettre en lien avec l'évolution de la demande des touristes de manière générale, et particulièrement en station. En effet, ces touristes skient moins longtemps, moins souvent lors de leur séjour. Aussi, diversifier l'offre touristique, c'est offrir au client tout un panel d'activités, une offre hors-ski, voire hors-neige, en hiver mais aussi en été, voire sur ce qu'on appelle les ailes de saison, en juin ou en septembre par exemple. En pratique, ces activités

peuvent être des randonnées de raquettes, en chiens de traîneau, mais aussi des visites de fermes, des sentiers de découverte du patrimoine environnemental, culturel, ou bien encore des prestations de balnéothérapie, de spa, largement plébiscitées aujourd'hui.

Diversifier l'offre touristique va de pair avec une valorisation des ressources du territoire et se déploie souvent à une échelle territoriale plus large que le seul périmètre de la station, avec comme objectif de moins dépendre de la seule saison hivernale. À l'image de la neige de culture, la diversification de l'offre touristique est souvent accompagnée par les pouvoirs publics. Si je reprends l'exemple du massif des Alpes, depuis les années 2000, l'expansion de l'offre hors-ski est encouragée via une politique spécifique financée par les Régions PACA et Auvergne-Rhône-Alpes, l'État et l'Europe.



Espaces valléens dans les Alpes françaises

Exemple des Espaces Valléens

Territoires ayant défini une stratégie et un plan d'actions visant à **moins dépendre de la seule économie «ski-neige»** et à **développer une offre touristique diversifiée**, à minima sur les saisons hivernales et estivales.

Sur la carte, on repère en bleu les 35 espaces valléens retenus sur la période 2014-2020. Ces espaces valléens sont des territoires plus ou moins vastes comprenant une ou plusieurs stations. Ils définissent une stratégie touristique, un plan d'action, cherchant à développer une offre touristique diversifiée a minima sur les saisons hivernales et estivales. Quand on analyse les actions définies par ces espaces valléens, ce que nous avons fait à INRAE, on constate que pour les 35 espaces valléens, sur le total des actions mises en œuvre, 60 % concernent la valorisation du patrimoine, environnemental et culturel, et le tourisme sportif doux, les randonnées pédestres et en vélo.

6. Conclusion

Aujourd'hui, ces deux stratégies d'adaptation, production de neige et diversification, se déploient dans les mêmes stations mais sont portées et mises en œuvre par des acteurs différents : le gestionnaire de domaine skiable pour la neige d'un côté et les collectivités territoriales pour la diversification de l'autre. Surtout, ce qui est en jeu pour le futur, c'est de mieux comprendre comment ces deux logiques s'articulent et avec quelle cohérence. Que disent-elles du devenir de la station face au changement climatique, de la capacité du territoire à engager une transition durable et juste ? En effet, si le changement climatique est un facteur crucial, d'autres éléments sont à considérer pour les stations et leur devenir : l'évolution de la demande touristique, l'évolution de l'immobilier de loisirs, la capacité financière des collectivités locales, mais aussi la volonté de participation des populations, autant de facteurs à prendre en compte dans une réflexion concertée sur le futur de ces territoires touristiques de montagne.

Zones littorales et changement climatique



Bruno CASTELLE

Directeur de recherche au CNRS

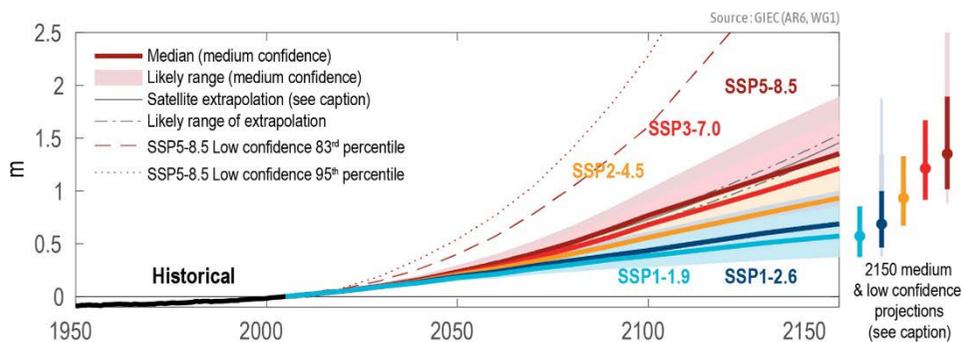
Le changement climatique est un phénomène global, lié essentiellement à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre d'origine anthropique au cours de ces dernières décennies. Même si on arrêterait demain complètement nos émissions, nous devrions faire face à un changement climatique à cause de l'inertie thermique des océans et de la durée de vie de ces gaz dans l'atmosphère. Il va donc falloir s'adapter. Or, si le changement climatique est un phénomène global, ses effets se feront particulièrement ressentir à l'échelle locale. C'est justement à cette échelle locale, celle des territoires, qu'on peut déployer de manière optimale des stratégies d'adaptation.

1. Impacts du changement climatique sur les zones littorales

Les zones littorales vont être principalement affectées par deux impacts directs du changement climatique. Le premier est l'augmentation du niveau marin. On voit ci-dessous, sur cette projection du GIEC, que même s'il y a des incertitudes quant à nos

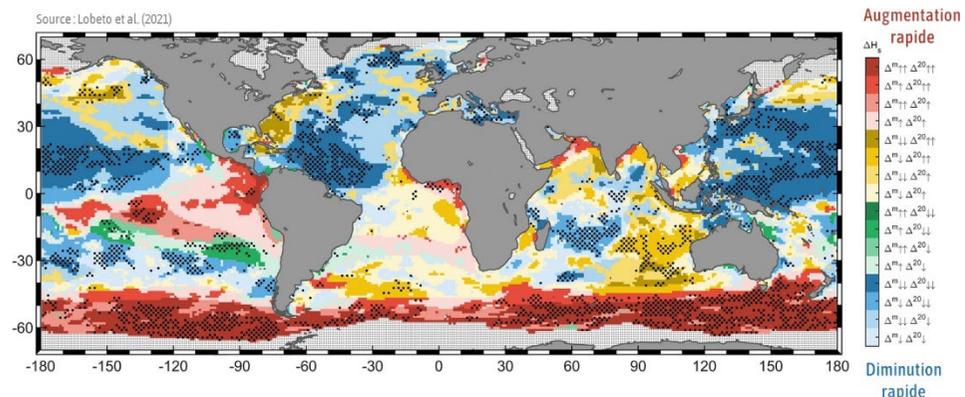
futures émissions, quant aux modèles, on voit qu'à l'horizon 2100, une augmentation du niveau marin de l'ordre de 1m est tout à fait possible.

Augmentation du niveau marin



L'autre impact est le changement des régimes de vagues : des vagues en moyenne, mais également des régimes de vagues de tempêtes. On voit sur la figure ci-dessous un code couleur qui vous montre si on va avoir une augmentation ou une diminution, lente ou rapide, des hauteurs de vagues en moyenne, mais également des hauteurs de vagues extrêmes.

Modification des régimes de vagues



On voit qu'on a une très forte variabilité spatiale. On a également des incertitudes importantes, même si on va avoir, globalement, une augmentation des extrêmes. Tout cela va affecter les aléas littoraux.

2. Submersion et érosion

On peut distinguer deux principaux aléas littoraux, particulièrement préoccupants. Il y a tout d'abord la submersion marine, qu'on définit comme l'inondation temporaire des zones côtières par la mer. Cela se produit généralement pendant un évènement extrême. Il y a aussi l'érosion, qui peut aussi avoir lieu pendant un évènement extrême, mais qui généralement est plutôt quelque chose de chronique et de structurel. On la définit comme le recul du trait de côte.

L'impact du changement climatique sur la submersion marine est relativement simple. Même si on fait abstraction des changements de régimes de vagues, l'augmentation du niveau marin, mécaniquement, va faire qu'on va avoir une augmentation de l'intensité et de la fréquence des évènements de submersion marine le long des côtes basses.

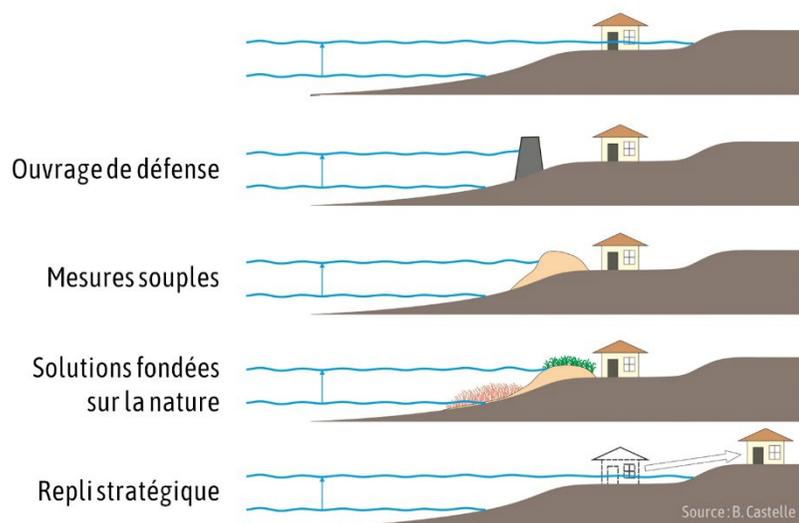
Concernant l'érosion, c'est beaucoup plus compliqué. L'érosion qu'on connaît actuellement sur les côtes, et en particulier sur les côtes sédimentaires, contrairement à ce qu'on entend dans les médias, est la majorité du temps non pas due au changement climatique mais plutôt à un déséquilibre qui peut exister entre différents flux sédimentaires. Il convient de noter que l'homme a également affecté ces flux au cours de ces dernières décennies. Les modèles montrent que le changement climatique va accélérer cette érosion. Les sites qui

étaient relativement stables vont également se mettre à s'éroder, mais tout ça va avoir plutôt lieu dans la seconde partie du XXI^e siècle.

3. Les stratégies d'adaptation

Quand on veut s'adapter, on cherche à réduire le risque. Le risque, c'est quand on a un aléa qui rencontre un enjeu. Sur le schéma ci-dessous, l'enjeu est symbolisé par une maison. Mais il pourrait être une ville, des infrastructures, voire un écosystème remarquable. Cet enjeu va être exposé à un aléa, qui va être la submersion marine ou l'érosion. Il peut y avoir plusieurs stratégies, qu'on peut classer de différentes manières.

Différentes stratégies d'adaptation



Tout d'abord, on peut ne rien faire. C'est une solution qui, généralement, n'est pas tenable. On peut mettre en place des

ouvrages de défense. Il s'agit de la lutte active, et c'est la doctrine de génie côtier jusqu'à la fin du XX^e siècle. Progressivement, on a vu également émerger des mesures dites "souples" qui accompagnent les processus naturels. On parle par exemple de gestion des dunes, ou de rechargement de plages. Plus récemment, on a vu apparaître des solutions fondées sur la nature, qui s'appuient sur la restauration des écosystèmes littoraux pour réduire les risques. Enfin, on a le repli stratégique qui consiste à déplacer les enjeux dans les terres.

Afin de savoir quelle stratégie choisir, il convient de rappeler quelques éléments de contexte. Tout d'abord, il faut partir du constat que les capacités de financement de la puissance publique sont bien inférieures au coût qui serait nécessaire pour renforcer et rehausser les ouvrages tels qu'on les connaît actuellement. Il va donc y avoir des choix inévitables à faire dans l'avenir. Ces choix devront se faire en croisant l'aléa physique avec les enjeux socioéconomiques, tout cela à l'échelle des territoires. Ils doivent aussi être vus comme une opportunité pour explorer des approches d'adaptation innovantes, dont font partie les solutions fondées sur la nature.

4. Exemples

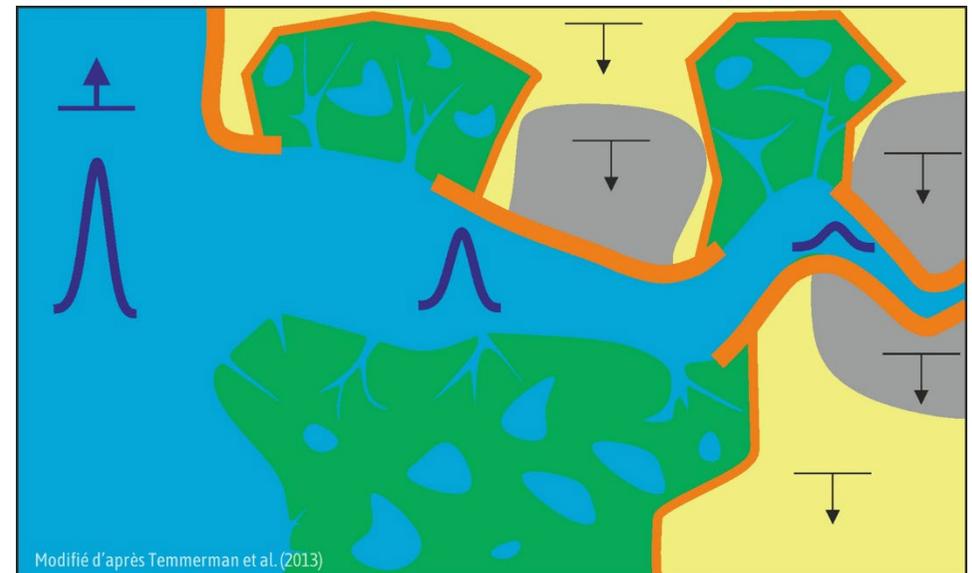
Dans les zones où il y a de forts enjeux, comme par exemple la ville de Saint-Malo, il est hors de question d'enlever des ouvrages de défense, en l'occurrence des digues. Il faut les renforcer. Mais il faut aussi savoir que ces ouvrages de défense en dur, s'ils ont la capacité de réduire le problème localement, ont quasiment systématiquement la particularité de déplacer le problème aux littoraux adjacents.

Un autre aspect important dans l'adaptation est la temporalité. Par exemple, la ville de Lacanau (sud-ouest de la France) est en train de renforcer l'ouvrage de défense du front de mer. C'est une stratégie à 10, 20, 30 ans. En parallèle, des réflexions sont menées afin de réfléchir à un repli stratégique des trois premières lignes de maisons, plutôt à l'horizon 2050.

Parmi les mesures dites "souples", il y a l'exemple des rechargements de plage. Cette solution peut être très efficace, par exemple sur la côte hollandaise, où il y a des stocks de sable importants et proches de la côte. On peut donc recharger les plages grâce à ce sédiment. En plus, ce littoral est exposé à des vagues générées dans la mer du Nord. Ce sont des vagues relativement courtes, qui diffusent très peu le trait de côte. Les rechargements de plage y sont là-bas efficaces, peu coûteux et durables. Ce n'est pas du tout le cas le long de côtes océaniques exposées aux vagues océaniques, qui diffusent énormément ces rechargements de plage, et où les stocks sédimentaires sont potentiellement appauvris.

Il y a aussi les solutions fondées sur la nature. L'exemple pris ici est celui des marais estuariens. Depuis des siècles, l'homme a avancé sur la Terre, notamment sur ces marais estuariens, en construisant des digues et en asséchant les marais, afin de cultiver et d'installer des villes. Le problème est qu'il y a une augmentation du niveau marin ainsi qu'une subsidence, c'est-à-dire que comme on a asséché et construit, le sol s'affaisse. Cela conduit finalement à une augmentation du niveau marin relatif. On a également des surcotes pendant les événements extrêmes. En raison de ces digues et de cet effet d'entonnoir, on se retrouve avec des niveaux d'eau relativement extrêmes à l'intérieur de l'estuaire, là où sont les enjeux. Il semblerait

qu'il faudrait ici rehausser les digues mais ce n'est pas forcément la bonne solution. On peut en effet penser aux solutions fondées sur la nature et restaurer ces marais littoraux, pas partout mais localement. On aura toujours la subsidence, l'augmentation du niveau marin, et des événements extrêmes apportant des surcotes. Mais pendant ces événements extrêmes, l'eau va inonder ces marais littoraux, ces marais littoraux vont également dissiper l'énergie des vagues, et on va se retrouver avec des niveaux d'eau beaucoup plus faibles, là où sont les enjeux. On n'a donc pas forcément besoin de rehausser les digues. Il faut voir aussi qu'à chaque événement extrême, les marais littoraux reçoivent du sédiment, et s'élèvent et s'ajustent naturellement à l'augmentation du niveau marin. Ce sont également des puits de carbone et des niches écologiques.



5. Conclusion

L'adaptation des territoires littoraux va être une nécessité. Il n'y a pas de solution générique. La meilleure solution doit être réalisée en faisant le croisement des aléas physiques et des enjeux socioéconomiques, à l'échelle des territoires. Il faut également prendre en compte d'autres paramètres, comme par exemple les capacités de financement ou certains aspects juridiques, notamment dans le cas de l'expropriation. Parmi l'éventail des stratégies, qui peuvent être combinées, les solutions fondées sur la nature doivent être plus mises en action. Enfin, les méthodes d'adaptation aux effets du changement climatique doivent faire l'objet de choix politiques courageux et difficiles, qui nécessitent la co-construction avec les citoyens. Il faudra donc, à l'avenir, très tôt dans le processus décisionnel, engager les citoyens pour accompagner ces transformations.

Les Solutions d'adaptation au changement climatique fondées sur la Nature dans les Outre-mer français



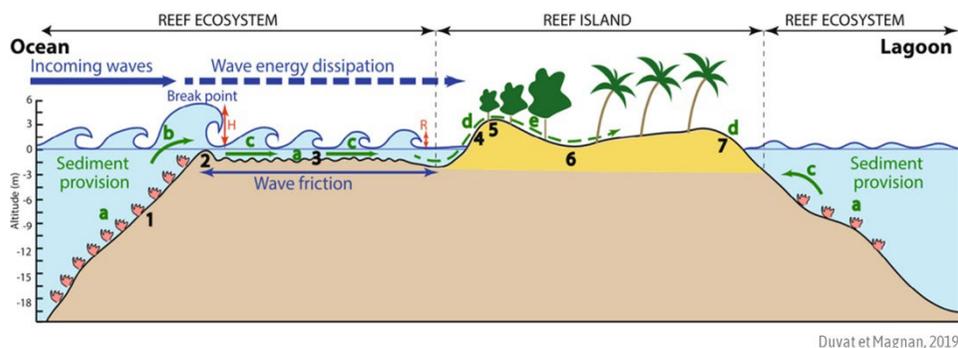
Virginie DUVAT
Professeure à La Rochelle Université

1. Définition

Les solutions d'adaptation au changement climatique fondées sur la nature (SafN) consistent en des actions qui visent à protéger, gérer de manière durable, restaurer ou recréer des écosystèmes, dans le but de réduire les impacts du changement climatique sur les sociétés humaines, tout en produisant des bénéfices pour la biodiversité et pour le bien-être humain. Ces SafN impliquent de travailler avec et de renforcer la nature. Elles sont ainsi ancrées dans la reconnaissance que les écosystèmes rendent des services à l'humanité.

Nous pouvons prendre l'exemple du service de protection côtière rendu par les récifs coralliens, qui tient à deux fonctionnalités du récif : l'atténuation des houles de tempête, que vous voyez en bleu sur le schéma ci-dessous, et qui réduit leurs impacts dévastateurs sur les aménagements humains, et la production de sédiments, qui apparaît en vert sur le schéma, qui, en alimentant les plages, renforce l'efficacité de ces barrières.

Exemple du service de protection côtière rendu par les récifs coralliens



L'idée est donc d'utiliser la capacité d'adaptation des écosystèmes pour faire face au changement climatique, à la place de, ou de manière combinée avec d'autres solutions non écosystémiques, comme l'ingénierie côtière ou la relocalisation des enjeux menacés à l'intérieur des terres.

Cette capacité d'adaptation naturelle des écosystèmes a toujours été utilisée pour se protéger des impacts des événements climatiques extrêmes, en particulier par les peuples autochtones. La nouveauté, aujourd'hui, est de l'utiliser pour faire face au changement climatique contemporain, et de la généraliser partout où ces solutions permettent de réduire significativement le risque.

2. Le projet de recherche ADAPTOM

Dans le cadre du projet de recherche ADAPTOM, nous avons recensé et analysé les SafN côtières dans les outremer français. Nous avons pu identifier 25 projets, qui permettent de dresser trois constats.

1. Ces projets de SafN côtières concernent des écosystèmes variés, des systèmes végétalisés aux herbiers marins et aux récifs coralliens.
2. La restauration de la végétation de haut de plage, en général indigène, domine. Elle a été introduite à partir du milieu des années 90 à La Réunion, et du milieu des années 2000 en Guadeloupe.
3. Certains territoires sont plus avancés dans cette voie que d'autres. C'est en particulier le cas de la Guadeloupe, qui expérimente des solutions diversifiées.

Pour prendre quelques exemples, je commencerai par les actions qui ont été déployées par le grand port maritime de la Guadeloupe, dans le cadre du projet Adapt'Island. Certaines actions consistent en une restauration de la mangrove, en particulier dans la zone industrielle de Jarry, dans laquelle elle a été très fortement dégradée par les pressions anthropiques.

Exemple de projet (1). Zone industrielle de Jarry, Guadeloupe

Ecosystème concerné

Mangrove

Espèces concernées

Palétuvier, palétuvier rouge, palétuvier blanc et palétuvier noir



- ❖ Enlèvement des espèces envahissantes
- ❖ Enlèvement des macro-déchets
- ❖ Rétablissement de la circulation d'eau

Ces opérations de restauration s'appuient sur trois actions complémentaires : l'enlèvement des espèces exotiques envahissantes et des macro-déchets, qui ont fortement affecté la qualité de cet écosystème, et le rétablissement de la circulation de l'eau dans la mangrove, qui a été bloquée par la construction des remblais accueillant les activités industrielles et commerciales.

Le deuxième exemple concerne la restauration des récifs coralliens. Le grand port maritime de la Guadeloupe y contribue à travers trois actions complémentaires : l'assistance à la reproduction sexuée des coraux, le bouturage et l'élevage de corail dans des fermes coralliennes, pour, enfin, réaliser la transplantation des coraux dans le milieu naturel, dans le but de restaurer des récifs coralliens dégradés.

Exemple de projet (2). Grand port maritime, Guadeloupe

Ecosystème concerné

Récifs coralliens

Espèces concernées

Corail corne de cerf, Corne d'élan, Madrace jaune, Porice digité, Grand corail étoilé

- ❖ Reproduction sexuée par récupération des gamètes
- ❖ Bouturage et installation en fermes coralliennes
- ❖ Transplantation des coraux



Un autre exemple concerne la restauration des plages de sable, qui sont de plus en plus affectées par l'érosion côtière. On peut prendre l'exemple du projet Rescue, qui a été porté par le service du tourisme de Polynésie française et appliqué à la plage publique de Tahiamanu,

sur l'île de Moorea. Ce projet a consisté en trois actions interconnectées : d'abord, l'implantation, sur l'avant-côte, d'un brise-lame immergé, qui a permis de casser l'énergie de la houle, et donc de réduire son pouvoir érosif, et aussi de fonctionner comme un piège à sable. Ce piège à sable a permis de disposer de sédiments pour recharger la plage en sable et lui redonner un profil d'équilibre. Enfin, la dernière étape a consisté à revégétaliser le haut de plage, pour stabiliser la plage.

Exemple de projet (3). Tahiamanu, Moorea

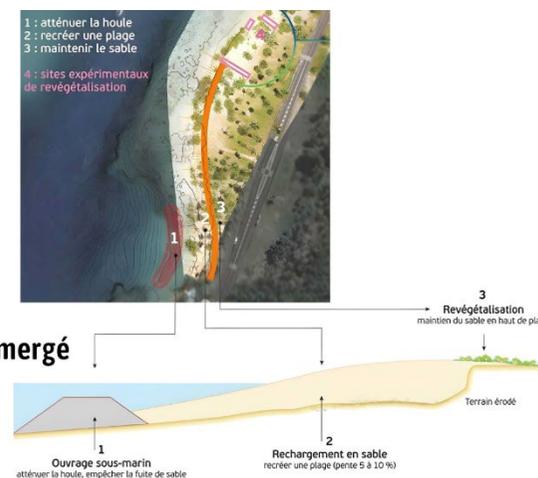
Ecosystème concerné

Plage de sable

Espèces concernées

Pohue tatahi, o'uru, noumata, tahinu

- ❖ Installation d'un brise lame immergé
- ❖ Rechargement de la plage
- ❖ Revégétalisation



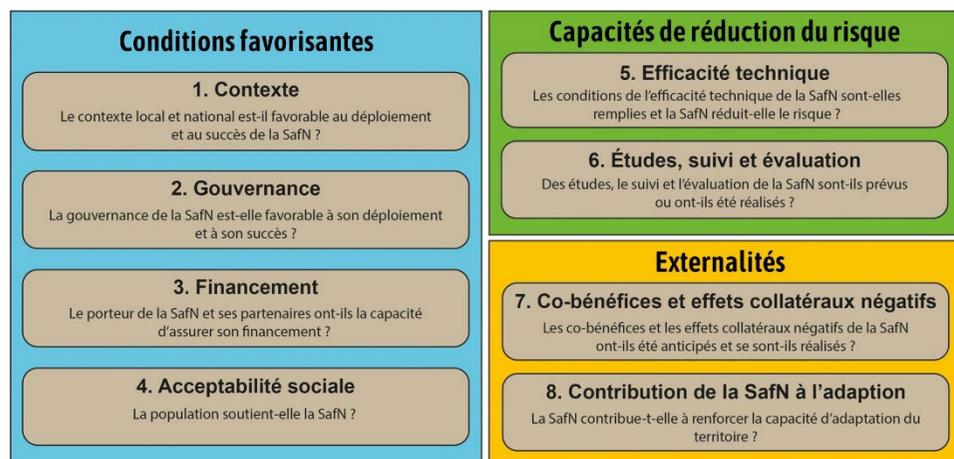
Source : V. Duvat, ADAPTOM, 2023

3. Evaluation des SafN

Pour déterminer si les SafN sont efficaces et adaptatives ou non, aujourd'hui, un enjeu majeur est d'évaluer ces projets. Pour le faire, on peut considérer trois grands domaines : les conditions favorisant des

SafN, les capacités de réduction du risque qu'elles ont, et enfin, leurs externalités, c'est-à-dire les impacts qu'elles génèrent.

Évaluer les SafN : 8 variables

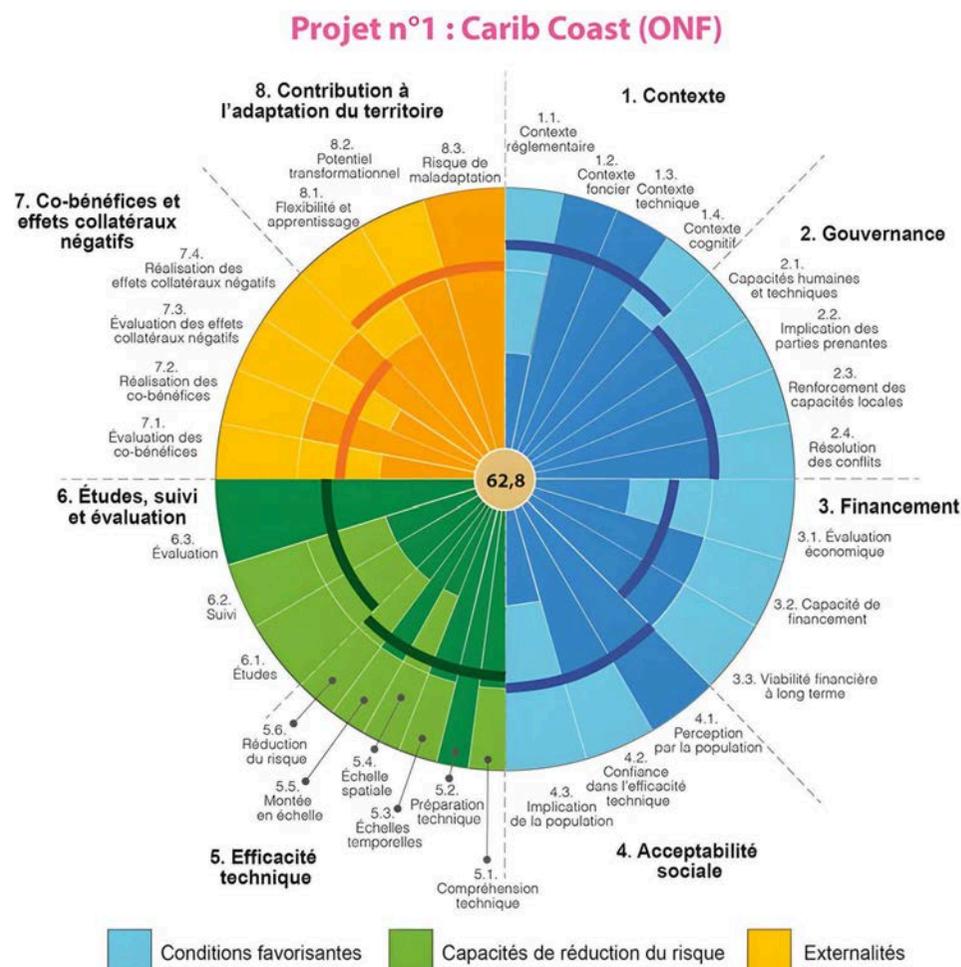


Source : V. Duvat, ADAPTOM, 2023

Ces trois domaines permettent d'englober 8 variables : 1) le contexte territorial, afin de déterminer s'il est favorable ou non à leur déploiement et à leur succès, 2) la gouvernance, ou capacité de gestion du risque des acteurs porteurs, 3) le financement, 4) l'acceptabilité sociale de ces solutions, 5) leur efficacité technique à réduire les risques (dans le cas présent : érosion côtière et submersion marine), 6) l'accompagnement de ces projets par les études, le suivi et l'évaluation nécessaires, 7) les co-bénéfices et les effets collatéraux négatifs que ces solutions engendrent, autrement dit leurs impacts, positifs et négatifs, au-delà de la réduction du risque, 8) leur contribution plus globale à l'adaptation des territoires.

Pour chacune de ces 8 variables, nous avons déterminé des indicateurs, 30 au total, qui sont évalués sur la base d'un système de scoring, qui repose lui-même sur la constitution d'une base de données qui a été co-construite avec les acteurs porteurs et partenaires des projets de SafN.

Évaluer les SafN : attribution de scores pour chacun des 30 indicateurs



Source : V. Duvat, ADAPTOM, 2023

Ce type de méthodologie permet de générer des résultats à trois niveaux : pour chacun des 30 indicateurs, à l'échelle de chacune des 8 variables, à l'échelle de chacun des projets, à travers le calcul d'un indice qui est ramené sur 100.

L'intérêt de ces méthodologies est qu'elles permettent de mettre en évidence les forces et faiblesses de ces projets, les leviers et les barrières à leur mise en œuvre, et ainsi de mesurer le capital adaptatif des projets qui sont déployés, et à travers ces projets, des territoires qui les portent.

L'analyse comparée des projets de SAFN permet de soutenir la démarche qui consiste à produire des apprentissages réciproques entre les acteurs qui les portent, et de capitaliser sur les savoir-faire. Ça permet aussi, collectivement, d'identifier des solutions communes à des difficultés qui sont rencontrées sur le terrain. Ce travail y est indispensable pour faire des SafN des leviers efficaces pour l'adaptation au changement climatique.

4. Intérêts et limites des projets de SafN étudiés

Dans le cadre du projet de recherche ADAPTOM, nous avons pu déterminer les limites des projets de SafN côtiers des outremer français, ainsi que leurs points positifs et les effets de levier qu'ils génèrent.

Au titre des limites, il y a d'abord le fait que la plupart de ces projets sont déployés à une échelle micro-locale, ce qui ne répond pas aux enjeux de la montée en échelle de l'adaptation sur les territoires. Une deuxième limite est l'insuffisance des capacités humaines disponibles

localement, en nombre et en niveau de formation, et des financements, ainsi qu'un manque d'implication des parties prenantes sur toute la durée des projets qui sont mis en œuvre. On constate par ailleurs que la plupart de ces projets sont portés et réalisés par des acteurs qui sont déjà engagés dans la restauration des milieux, parce qu'elle relève de leur mission principale, et déployés sur du foncier dédié, en général public. C'est un avantage, mais aussi un inconvénient, dans la mesure où cela constitue un blocage pour la montée en échelle des SafN. On observe par ailleurs une absence de dimension prospective de ces projets, qui, en général, ne s'appuient pas, comme ils devraient le faire, sur une évaluation des risques futurs d'érosion côtière et de submersion marine, et donc ne sont pas calibrés pour durer dans le temps, face aux pressions climatiques. Enfin, ces projets sont rarement intégrés dans une stratégie d'adaptation plus globale et transformationnelle des territoires, ce qui limite leur portée.

Au titre des points positifs, il y a d'abord la bonne acceptabilité sociale des SafN, qui sont populaires dans tous les outremer, l'existence de savoir-faire bien établis sur certaines techniques, comme la restauration des systèmes côtiers végétalisés, les nombreux co-bénéfices et l'absence ou le faible nombre d'effets négatifs de ces projets. Enfin, il y a un début d'engagement, à la fois dans leur financement et dans leur mise en œuvre, des acteurs privés, qui peuvent constituer un levier fondamental dans l'augmentation des financements dédiés à l'adaptation au changement climatique.

Pour conclure, il est important de souligner qu'intégrer ces données issues de démarches d'évaluation dans les observatoires côtiers, naissants ou en phase de consolidation aujourd'hui, est fondamental pour suivre les progrès de l'adaptation au changement climatique.

L'Accord de Paris sur le climat et les Objectifs de Développement Durable

Henri Waisman

Chercheur à l'Institut de développement durable et des relations internationales (IDDRI)



Je vais discuter des liens entre l'Agenda 2030 qui définit les 17 Objectifs du développement durable, les ODD, et l'Accord de Paris sur le climat.

1. Différences entre les ODD et l'Accord de Paris

Ces deux accords ont été négociés en parallèle et adoptés à quelques mois d'intervalle à la fin de l'année 2015. Les pays sont les signataires de ces accords dans les deux cas. Mais les processus ont différé de façon assez significative.

L'Agenda 2030 est le résultat d'un processus de délibération relativement large et a donné lieu à une approbation en session plénière à l'ONU. L'Accord de Paris est le résultat d'un processus de négociation entre parties de la Convention-cadre des Nations unies sur le climat : la CCNUCC.

L'Agenda 2030 définit un ensemble d'objectifs et de cibles que les pays sont libres de choisir et de prioriser en fonction des spécificités de leurs circonstances nationales. L'Accord de Paris sur le climat, lui, définit un objectif collectif et impose aux pays de définir leur contribution spécifique sous la forme de contributions déterminées au niveau national, les CDN, qui répertorient les engagements et les actions que les pays vont prendre pour satisfaire l'objectif commun.

En termes d'horizon temporel, 2030 est un horizon commun à ces deux processus. 2030 est l'horizon auquel sont définis les objectifs de développement durable. Et c'est aussi l'horizon qui a été pris dans la plupart des contributions déterminées au niveau national. Cependant, l'Accord de Paris prend également une perspective de plus long terme. Nous reviendrons sur ce point qui est particulièrement important.

2. Le climat dans les ODD

Il convient de noter que le climat fait l'objet d'un ODD spécifique, l'ODD numéro 13, qui montre, de façon extrêmement claire, l'intégration de la problématique climatique au sein des objectifs du développement durable. Pour aller plus loin sur cette question du lien entre développement durable et climat, je vais m'appuyer sur les résultats du dernier rapport du GIEC sur un réchauffement global à 1,5°C, qui notamment consacre un chapitre entier, le chapitre 5, à l'analyse des liens entre : Objectifs de développement durable, éradication de la pauvreté, réduction des inégalités et action climatique. Les conclusions de l'analyse sont extrêmement claires et univoques. Les liens entre développement durable et climat sont extrêmement proches, voire même indissociables.

L'action climatique repose sur tout un ensemble d'actions sur des réductions d'émissions dans des secteurs clés : l'énergie, le transport, l'industrie, l'agriculture, la forêt, qui font chacun l'objet d'Objectifs de développement durable spécifiques.

La préservation des écosystèmes qui est au cœur des ODD 14 et 15, pour les écosystèmes marins et les écosystèmes terrestres, est aussi une condition nécessaire pour toute ambition climatique ; ne serait-ce qu'à cause du rôle important de ces écosystèmes comme puits de carbone.

Les effets du changement climatique sont intimement liés à la question de la pauvreté et des inégalités ; ne serait-ce que parce que les populations les plus pauvres sont aussi celles qui sont les plus exposées au changement climatique.

Les effets du changement climatique affectent également l'accès des populations à tout un ensemble de biens clés et en particulier à l'alimentation, ODD numéro 2, et à l'eau, ODD numéro 6.

Enfin, toute ambition climatique de grande ampleur, telle que celle définie dans l'Accord de Paris, demande explicitement un processus de coopération internationale qui est au cœur de l'ODD numéro 17.

3. L'objectif climatique de l'Accord de Paris

Pour aller au-delà de ces questions sur les liens entre ODD, Objectifs de développement durable et climat, revenons sur la question de la définition de l'objectif, précisément telle qu'elle est donnée dans l'Accord de Paris sur le climat. Dans son article numéro 2, l'Accord de

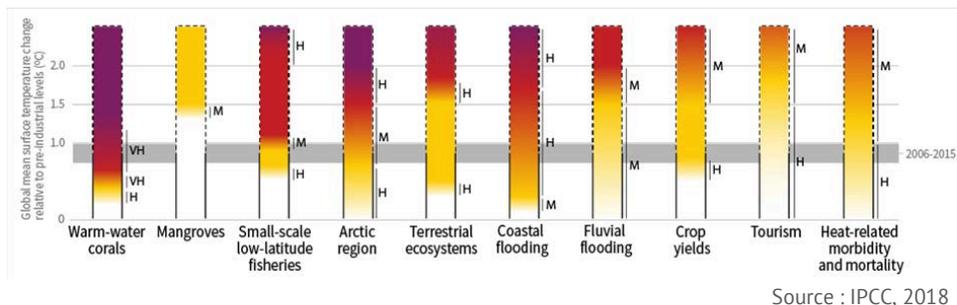
Paris sur le climat définit l'objectif comme la stabilisation de la température globale par rapport à l'ère préindustrielle, bien en deçà de 2°C et poursuivre les efforts pour atteindre 1,5°C. Il précise également les conditions pour atteindre cet objectif. Dans son article 4.1 qui montre, notamment, la nécessité de la prise en compte du long terme puisque cet article rend explicite le fait que l'atteinte de l'objectif demande d'atteindre la neutralité en gaz à effet de serre à un horizon de la deuxième moitié du 21^e siècle. Il s'agit donc d'un enjeu fondamental pour la prise en compte du climat au cœur de l'Accord de Paris, d'être capable de prendre en compte cette perspective de long terme et donc d'aller au-delà de la temporalité 2030, qui est celle donnée par les objectifs du développement durable.

4. Objectif climatique et Objectifs de Développement Durable

Que peut-on dire, du coup, quand on se pose cette question, des liens avec une perspective plus générale, entre objectifs de développement durable et protection du climat ?

4.1. Quel développement à +2°C ?

Pour cela, je vais commencer par analyser un graphique (ci-dessous), tiré encore du rapport du GIEC, qui décrit les impacts et les risques liés au changement climatique sur un ensemble de dimensions, avec en ordonnée différents niveaux de réchauffement global.



Sur ce graphique, plus la couleur est claire, plus les impacts sont faibles ; donc blanc est "impacts indétectables". Le plus foncé sont des impacts très forts.

Ce que l'on peut tirer de cette figure c'est que, déjà, aujourd'hui, les impacts du changement climatique sont extrêmement visibles sur tout un ensemble de dimensions. On est, aujourd'hui, environ à 1°C de réchauffement global - donc c'est la zone grisée sur le graphique - et on voit clairement sur l'analyse que toute augmentation de la température va induire une augmentation des impacts, comme c'est montré par une gradation du plus clair vers le plus foncé en ordonnée.

Deuxième conclusion, c'est que, même à un niveau de réchauffement global à 2°C, qui est déjà un objectif climatique relativement ambitieux, pour tout un ensemble de dimensions, les impacts sont sérieux ou très sérieux. Ce qui montre que, finalement, l'enjeu fondamental de la politique climatique, ça va être de limiter au maximum l'impact du changement climatique. Ses effets, notamment, seront beaucoup moins importants si on prend une politique beaucoup plus ambitieuse qui nous permet de se rapprocher au maximum d'un niveau 1,5°C. Dit autrement : stabiliser le climat aussi bas que possible est une condition fondamentale pour limiter les impacts et pour

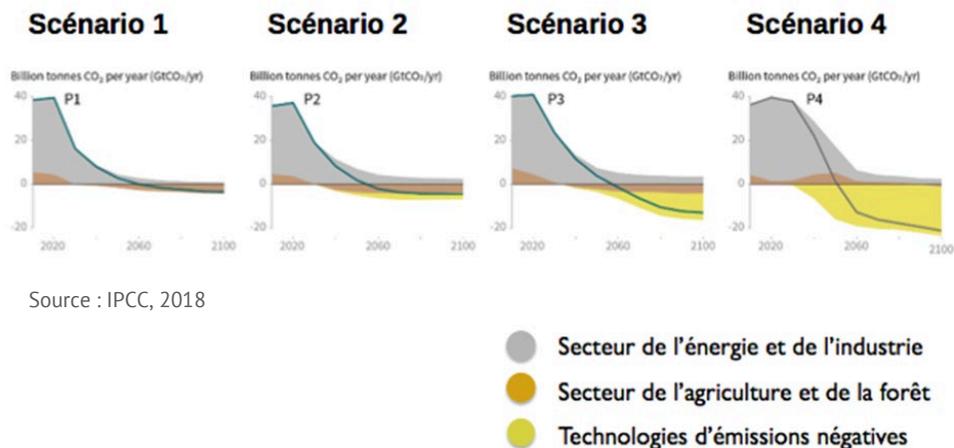
faciliter au maximum l'atteinte des Objectifs du développement durable.

4.2. Réduction des émissions et développement durable

La question fondamentale, qui va se poser maintenant, c'est de savoir : est-ce que l'on va être capable de mettre en place les mesures adaptées pour réduire les émissions, de façon adaptée à un objectif climatique ambitieux, tout en préservant les Objectifs de développement durable ?

Pour cela, on est amené à considérer le fait que des mesures prises pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre peuvent, dans certains cas, avoir des synergies évidentes avec certains Objectifs du développement durable. On peut, par exemple, citer la réduction du charbon, la réduction des voitures en ville, qui à la fois permettent de réduire les émissions de gaz à effet de serre, donc de contribuer à la limitation du changement climatique, et aussi, ont des effets bénéfiques sur des éléments tels que la pollution locale et les effets sur la santé associés.

Cependant, il est aussi essentiel de reconnaître qu'un certain nombre de mesures prises pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, et notamment le CO₂, peuvent avoir des effets de tensions avec certains Objectifs du développement durable. Pour instruire plus avant cette question-là, je vais m'appuyer sur les scénarios analysés par le dernier rapport du GIEC, qui décrivent différentes façons d'atteindre l'objectif 1.5°C, en fonction de différents types de trajectoire, de 2010 à 2100, pour trois catégories d'émissions (figure ci-dessous).



Source : IPCC, 2018

Ce que l'on voit quand on regarde ces scénarios, c'est qu'il y a différentes possibilités d'atteindre l'objectif 1,5°C qui ont des trajectoires différentes. Focalisons-nous d'abord sur le scénario 4, qui est celui qui ressemble probablement le plus au scénario de poursuite des tendances actuelles, puisque l'on voit que c'est un scénario qui suppose une croissance encore pour quelques années des émissions de CO₂. On voit que ce scénario 4 démontre que cette poursuite des tendances peut être compatible avec la poursuite d'un objectif climatique ambitieux, mais qu'il suppose une utilisation à très grande échelle des émissions négatives, dans la deuxième partie du siècle notamment, comme le montre cette grande bande jaune à la fin. Donc importance des technologies d'émissions négatives. Ce qui pose, en retour, un défi particulier pour certaines dimensions du développement durable, notamment parce que ces technologies d'émissions négatives utilisent du sol pour faire pousser des plantes qui vont permettre ensuite de réaliser ces émissions négatives. Or, dans un scénario comme le scénario 4, ces émissions négatives sont tellement importantes qu'elles demandent de consacrer une part

importante des sols à ces usages. Dans le scénario 4, l'ordre de grandeur que l'on peut retenir, c'est que l'on imagine qu'une surface comparable à celle de l'Australie entière serait couverte de plantes utilisées pour faire des émissions négatives. Ce qui crée en retour un risque, par exemple, de compétition avec d'autres usages des sols, par exemple l'alimentation, et donc risque de créer une tension avec l'objectif de sécurité alimentaire.

Si on considère à l'inverse le scénario 1, qui atteint également l'objectif climatique de 1,5°C. Mais il l'atteint d'une façon extrêmement différente, en considérant une action accélérée beaucoup plus forte à court terme de réduction des émissions. Ce scénario permet d'atteindre l'objectif de 1,5°C, sans pour autant avoir besoin de consacrer toutes les terres dont on a parlé juste avant pour des émissions négatives et donc réduit significativement les risques que fait peser le processus d'atténuation sur la sécurité alimentaire. C'est donc un premier message fondamental qui est que l'accélération de l'action, et donc l'accélération des réductions d'émissions à court terme, est une condition fondamentale qui permet de mieux aligner les Objectifs de développement avec l'action climatique ambitieuse. Maintenant, si on considère ce scénario 1, évidemment que la réduction à court terme de ces émissions, et notamment des émissions associées au secteur de l'énergie, pose un certain nombre de défis. Et que si ces réductions sont associées à des réductions aussi d'accès à un certain nombre de services, on peut avoir des tensions entre ces trajectoires d'émissions et l'atteinte d'autres Objectifs de développement durable, tels que l'accès à des services de mobilité, l'accès à des services domestiques comme le chauffage, par exemple. La question fondamentale est donc de savoir si on va être capable de construire des stratégies adaptées pour induire ces réductions rapides

de gaz à effet de serre, et notamment au cœur du secteur de l'énergie, de façon à satisfaire, tout de même, les objectifs énergétiques associés.

4.3. Quelles stratégies ?

Il se pose la question fondamentale de la définition des stratégies à appliquer puisque, ce qui est évident, c'est qu'étant donné l'hétérogénéité des situations, il n'y a pas de solution miracle. Il n'y a pas une solution qui permettrait d'aligner la réduction des émissions associées à la consommation de l'énergie avec d'autres objectifs. Il y a un besoin fondamental de prendre en compte les spécificités de chaque contexte national. Parce que c'est seulement si on fait ça que l'on va être capable de mieux bâtir sur les opportunités, les avantages de chacun des contextes et de faire face aux défis spécifiques qui peuvent se poser étant donné la situation du pays. Il y a donc la deuxième condition pour être capable d'aligner trajectoires d'émissions ambitieuses pour le climat et objectifs de développement durable, c'est la construction de stratégies adaptées, pensées en fonction du contexte par tous les acteurs, qui permettent justement d'articuler au mieux les Objectifs de développement durable et la réduction des émissions.

5. Conclusion

Si on prend ces deux éléments : nécessité d'une action rapide articulée dans le temps et nécessité d'une stratégie bien pensée et spécifique aux différents contextes, on retrouve, en fait, l'esprit d'un article fondamental de l'Accord de Paris, l'article 4.19 :

[Toutes les Parties devraient s'employer à formuler et communiquer des stratégies à long terme de développement à faible émission de gaz à effet de serre, en gardant à l'esprit l'article 2 compte tenu de leurs responsabilités communes mais différenciées et de leurs capacités respectives, eu égard aux différentes situations nationales.]

C'est donc maintenant aux différents acteurs et en premier lieu aux États de se saisir de cet outil pour permettre de construire au mieux les stratégies de transformation qui vont permettre d'aligner Objectifs de développement et objectifs climatiques.

Retrouvez également toutes les vidéos de cette formation sur :



<https://me-qr.com/l/Climat2-YouTube>



<https://me-qr.com/l/climat2-CanalU>

Téléchargez* tout ou partie de ce parcours de formation sur :



<https://me-qr.com/l/moodle-climat2>

* Service réservé aux établissements membres de la Fondation UVED

Avec le soutien financier de :



[CC BY-NC-ND 4.0 International](#)

Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification

Edition UVED – Mai 2024

Citer cet ouvrage :

UVED. Le livre numérique Changement climatique : impacts, atténuation et adaptation [en ligne]. Fondation UVED, 2024, 128 p. Disponible à l'adresse : https://ressources.ued.fr/eBook/eBook_UVED_Parcours_Changement_climatique.pdf