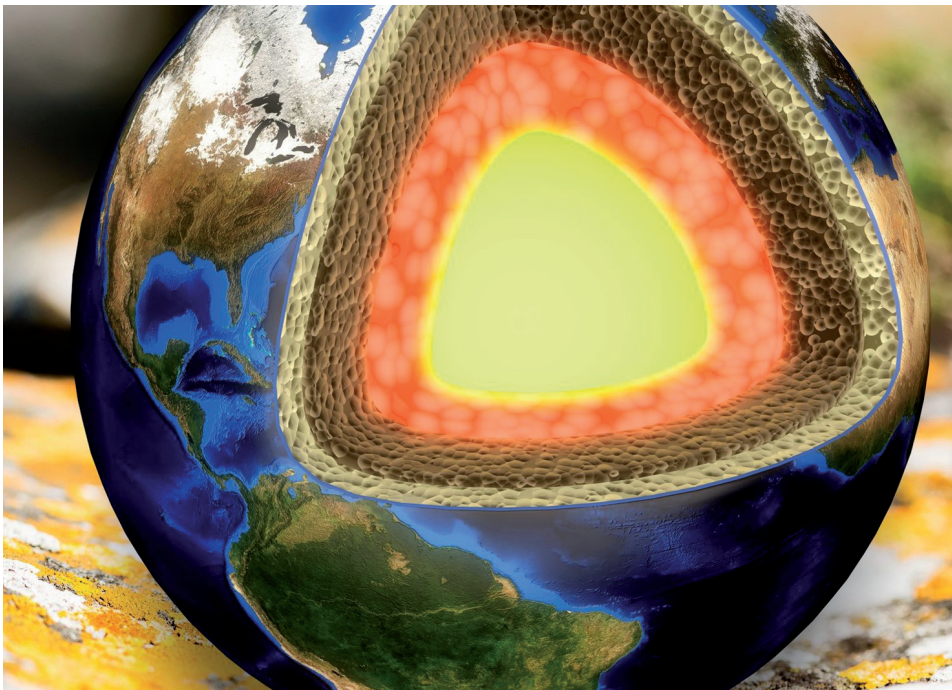


# COMPTES RENDUS DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

---

1778-7025 (electronic)

## *Géoscience* *Sciences de la Planète*



Volume 352, Special Issue 4-5, décembre 2020

**Special issue / Numéro thématique**

Facing climate change, the range of possibilities / *Face au  
changement climatique, le champ des possibles*

Académie des sciences — Paris



INSTITUT DE FRANCE  
Académie des sciences



# *Comptes Rendus*

---

## *Géoscience*

### **Objective of the journal**

*Comptes Rendus Géoscience* is an internationally peer-reviewed electronic journal covering the full range of earth sciences and sustainable development. It publishes original research articles, review articles, historical perspectives, pedagogical texts, and conference proceedings of unlimited length, in English or French. *Comptes Rendus Géoscience* is published according to a virtuous policy of diamond open access, free of charge for authors (no publication fees) as well as for readers (immediate and permanent open access).

**Editorial director:** Étienne Ghys

**Editors-in-chief:** Éric Calais, Michel Campillo, François Chabaux, Ghislain de Marsily

**Editorial Board:** Jean-Claude André, Pierre Auger, Mustapha Besbes, Sylvie Bourquin, Yves Bréchet, Marie-Lise Chanin, Philippe Davy, Henri Décamps, Sylvie Derenne, Michel Faure, François Forget, Claude Jaupart, Jean Jouzel, Eric Karsenti, Amaëlle Landais, Sandra Lavorel, Yvon Le Maho, Mickaele Le Ravalec, Hervé Le Treut, Benoit Noetinger, Carole Petit, Valérie Plagnes, Pierre Ribstein, Didier Roux, Bruno Scaillet, Marie-Hélène Tusseau-Vuillemin, Élisabeth Vergès

**Editorial secretary:** Adenise Lopes

### **About the journal**

All journal's information, including the text of published articles, which is fully open access, is available from the journal website at <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/geoscience/>.

### **Author enquiries**

For enquiries relating to the submission of articles, please visit this journal's homepage at <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/geoscience/>.

### **Contact**

Académie des sciences

23, quai de Conti, 75006 Paris, France

Tel: (+33) (0)1 44 41 43 72

[CR-Geoscience@academie-sciences.fr](mailto:CR-Geoscience@academie-sciences.fr)



The articles in this journal are published under the license  
Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)  
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>



---

## Contents / Sommaire

<b>Etienne Ghys, Ghislain de Marsily</b> La Science n'est pas Floue ...	247-249
<b>Valérie Masson-Delmotte</b> Réchauffement climatique : état des connaissances scientifiques, enjeux, risques et options d'action	251-277
<b>Mireille Delmas-Marty</b> Le changement climatique, une chance pour l'humanité ?	279-283
<b>Pierre Léna, David Wilgenbus</b> Changement climatique et éducation	285-296
<b>Venkatramani Balaji</b> « Science des données » versus science physique: la technologie des données nous conduit-elle vers une nouvelle synthèse?	297-307
<b>Céline Guivarch</b> Quelles transformations pour l'atténuation du changement climatique ? Des trajectoires d'émissions mondiales à la trajectoire française	309-317
<b>Henri Waisman</b> Quelles transitions pour l'atténuation du changement climatique ? Transformations globales, enjeux sociétaux, et leçons pour la décision	319-328
<b>Hervé Le Treut</b> Anticiper l'évolution des territoires	329-337
<b>Isabelle Chuine</b> Changement climatique et biosphère	339-354
<b>Didier Roux</b> Énergie et climat : défis et innovations	355-360
<b>Vincent Vigié</b> Les villes et le climat : Bâtiments et urbanisme	363-372
<b>Yves Bréchet</b> Le rôle de l'énergie nucléaire dans la lutte contre le réchauffement climatique : atouts et faiblesses dans une approche intégrée	373-381
<b>Isabelle Czernichowski-Lauriol</b> Captage et Stockage du CO <sub>2</sub> : le puits de carbone géologique	383-398
<b>Jean-Marie Tarascon</b> Les batteries sont-elles la bonne option pour un développement durable ?	401-414







---

Facing climate change, the range of possibilities / *Face au changement climatique, le champ des possibles*

Introduction / *Introduction*

## La Science n'est pas Floue ...

Etienne Ghys<sup>a</sup> et Ghislain de Marsily<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Secrétaire Perpétuel de la première division, Académie des sciences, France

<sup>b</sup> Editor-in-Chief, Comptes Rendus Géoscience, Académie des sciences, France

Courriels : [etienne.ghys@academie-sciences.fr](mailto:etienne.ghys@academie-sciences.fr),

[ghislain.demarsily@academie-sciences.fr](mailto:ghislain.demarsily@academie-sciences.fr)

Un article récent du journal *Libération* titrait « Les savants flous ». L'image de la science dans le public a été considérablement perturbée par l'épidémie de Covid. Tout à coup, en l'espace de quelques semaines, le monde a pris conscience que la science n'est pas faite que de certitudes. Pire encore, des experts de toute nature, dont certains scientifiques éminents, ont exposé des points de vue contradictoires. Depuis quelques décennies, la science avait mauvaise presse et on lui prêtait beaucoup de maux, souvent de manière irrationnelle : OGM, énergie nucléaire, vaccins, etc. Mais on croyait encore à la vérité scientifique : des savants, parfois vus comme des apprentis sorciers, élaboraient des théories certes indiscutables mais dont les applications pouvaient parfois aller à l'encontre du bien public. Et voilà que des désaccords entre scientifiques apparaissent au grand jour !

Pourtant les scientifiques le savent bien : depuis toujours, la recherche est faite de débats entre opinions différentes, qui tendent vers une forme de vérité jamais véritablement atteinte. On ne compte plus les exemples de querelles dans toutes les sciences. En physique, le débat a fait rage au 19<sup>e</sup> siècle à l'Académie des sciences autour de l'existence des atomes. En biologie, c'est la théorie de l'évolution ou les microbes qui ont été mis en question. Dans les sciences de la Terre, la tectonique des plaques a mis très longtemps avant d'être acceptée dans les années 1960,

et l'origine du réchauffement climatique était encore très récemment l'objet de débats houleux. Même la science mathématique, pourtant considérée comme le temple de la vérité, n'est pas exempte de ce genre de questions et a dû affiner le concept de vérité. Le théorème de Pythagore est vrai dans la géométrie euclidienne qu'on enseigne à l'école mais devient faux dans la géométrie hyperbolique très utilisée aujourd'hui dans la recherche mathématique. Dans chaque discipline, le mot « vrai » a un sens extrêmement précis, bien connu des spécialistes, mais qu'il faut expliquer au néophyte. La théorie de la gravitation de Newton a été détrônée par la théorie de la relativité d'Einstein mais elle n'en demeure pas moins vraie et utile dans d'innombrables situations, de même que les théories modernes de la gravitation précisent celle d'Einstein. Il ne faut bien sûr pas en conclure que la vérité scientifique est relative et que ses conclusions ne sont pas solides. La théorie de l'évolution, la tectonique des plaques, ou le réchauffement de notre planète ne seront plus jamais remis en question : ce sont des faits acquis et désormais indiscutables. Les points qui sont en discussion sont des faits « nouveaux », comme l'apparition d'un virus, qui se transformeront par la suite en « vérité scientifique » après le passage par une polémique souvent constructive. C'est sur le front de la recherche que les luttes et les discussions ont lieu. À l'arrière, le terrain est sécurisé et c'est tant mieux !

Les scientifiques ont une grande part de responsabilité dans cette image faussée de leurs disciplines. Le plus souvent, ils se gardent bien de montrer publiquement leurs désaccords et ils n'expliquent que rarement la méthode scientifique, faite d'essais et d'erreurs. Ils aiment montrer les succès et cachent les chemins tortueux qu'ils ont suivis pour y parvenir. Les manuels scolaires racontent la gloire d'un Le Verrier qui découvre au 19<sup>e</sup> siècle la planète Neptune « du bout de sa plume », comme disait Arago, en faisant des calculs de mécanique céleste, mais ils oublient de dire que le même Le Verrier, entraîné sur sa lancée, a « découvert » par la suite une autre planète...qui n'existe pas (et qu'il avait même baptisée Vulcain) ! Il est vrai que, très lentement, la communauté scientifique a pris conscience de la nécessité de la diffusion des sciences, pas seulement comme une liste de résultats magnifiques, mais aussi comme un ensemble d'hypothèses et de conclusions provisoires qui sont en cours de validation, parfois contradictoires. En quelque sorte, le petit Corona virus est semblable à l'enfant du conte d'Andersen qui crie que le roi est nu : l'épidémie a forcé subitement les scientifiques à se dévoiler et à montrer publiquement la complexité de leur monde. C'est dommage car la science en train de se faire est encore plus belle et passionnante quand elle est mise à nu.

La question du climat est analogue, mais sur une échelle de temps différente. Il a fallu trois semaines aux Français pour comprendre ce qu'est une épidémie, un virus, ou une zoonose, mais il leur a fallu trente ans pour comprendre ce qu'est le réchauffement climatique et l'effet de serre. Les débats entre climatologues ont été violents et lorsque le public en a pris connaissance, il a souvent conclu que la science est décidément floue, qu'elle est incapable de prédire l'avenir, et que les experts ne sont pas d'accord. Là encore, les scientifiques ont une part de responsabilité. Ils n'ont que rarement été capables d'expliquer la complexité des problèmes, le grand nombre de vérités indiscutables, mais aussi le caractère non définitif de certaines conclusions en cours de discussion. Les médias ont tendance à oublier les consensus et adorent mettre en avant les désaccords.

S'il n'y avait pas de science, nous n'aurions pris conscience que trop tard du réchauffement climatique. Il ne s'agit en effet que d'une augmentation de quelques fractions de degrés chaque année, immergées au milieu de variations de températures plus im-

portantes, essentiellement aléatoires : le phénomène ne devient sensible qu'au long terme. Si on n'avait pas inventé le thermomètre, qui aurait pu dire avec certitude qu'il fait plus chaud aujourd'hui qu'il y a cent ans ? La science a joué le rôle de lanceur d'alerte, avant la catastrophe.

Le colloque « Face au changement climatique, le champ des possibles » est une tentative pour remédier à ce problème. Il s'agit de proposer au public un état des lieux de ce qui est acquis et solide, mais aussi de ce qui est en train de se faire, et de ce qu'il faudrait faire à l'avenir pour éviter le pire. Ce n'est pas facile car le fonctionnement du système Terre est extrêmement complexe et sa compréhension met en jeu à peu près toutes les sciences : physique, météorologie, climatologie, thermodynamique, astronomie, chimie, géologie, biologie, sans oublier les mathématiques, toujours utiles et nécessaires. Chacune de ces sciences fonctionne à des échelles de temps et d'espace qui leur sont propres. La géologie avec ses millions d'années, la climatologie avec des centaines d'années, ou la météorologie pour laquelle on parle plutôt de jours. Les unités d'espace aussi sont très variées, des milliers de kilomètres jusqu'à des tailles microscopiques, par exemple pour la physique des nuages. Tout cela interagit de manière compliquée et n'est certainement pas facile à expliquer au grand public. On est bien loin de la science de Galilée, facile à comprendre, qui permet de prédire avec précision le temps que met un caillou pour tomber du haut de la tour de Pise. Aujourd'hui, on peut prédire sans problème la position de la Lune dans mille ans à quelques mètres près, mais on a compris qu'une telle précision serait illusoire s'il s'agissait d'un million d'années. De la même manière, on peut prévoir avec une très bonne probabilité s'il pleuvra demain, mais il est presque impossible de savoir s'il pleuvra dans un mois. Quel sera le climat dans cinquante ans ? C'est cette complexité, associant certitudes et probabilités, qui est difficile à transmettre au public général.

Il s'agit également pour les scientifiques de faire connaître les risques révélés par leur recherche, sachant que cette notion de risque voisine nécessairement celle d'incertitude. L'incertitude n'est pas une ignorance, mais la reconnaissance d'une variété de futurs possibles, dont l'importance s'apprécie par rapport à la vulnérabilité des systèmes écologiques, économiques, sociaux qui peuvent être affectés. Ce

devoir d'alerte, qui touche une très large gamme de situations dans nos vies courantes, peut donc prendre ici des formes extrêmement précises.

L'enjeu est important. La communauté scientifique a le devoir de communiquer au public l'état des connaissances, en insistant à la fois sur des faits bien établis et sur les problèmes qui restent en suspens ou qui font l'objet de débats. La difficulté du travail et du diagnostic des chercheurs ne les exonère pas du devoir de citoyen que chacun doit accomplir à la mesure de ses compétences. Ce devoir est inscrit dans notre Constitution, via le principe de précaution.

Une fois le public informé de la situation par les scientifiques, il revient à la société entière, représentée par ses élus, de prendre des décisions. Les élus doivent également prendre en compte d'autres éléments, de nature économique ou éthique, par exemple. Cela s'est illustré de manière très claire récemment à l'occasion du confinement imposé à la population : la science ne peut être que l'un des arguments utilisés par les politiques. Ce n'est peut-être que l'un des arguments, mais il est essentiel.

Etienne Ghys

### **Numéro spécial « Face au changement climatique, le champ des possibles »**

Ce numéro spécial est issu du colloque homonyme organisé par l'Académie des sciences à l'Institut de France les 28 et 29 janvier 2020. Ce colloque, coordonné par Sébastien Balibar, Jean Jouzel et Hervé Le Treut, avec le concours de Didier Roux (membres de l'Académie des sciences) a réuni environ 600 personnes, sans compter les personnes ayant suivi le colloque sur leur ordinateur... Le programme complet est disponible sur le site de l'Académie<sup>1</sup> ainsi que l'enregistrement intégral des exposés et séances de discussion.<sup>2</sup> L'organisation du colloque a été rendue possible grâce au soutien de la Compagnie Financière Jacques Cœur et de l'entreprise Saint-Gobain. Les textes réunis dans ce numéro spécial ont été pré-

parés par ceux des orateurs du colloque qui ont bien voulu rédiger a posteriori un texte écrit reprenant le contenu de leur exposé oral; ces textes fournissent ainsi un excellent éclairage du contenu du colloque. Que leurs auteurs en soient ici remerciés. Ces textes ont été relus et mis en forme par le Comité éditorial des CR-Géoscience et le Service des Comptes Rendu. Le but du colloque était de fournir un état des lieux de ce qui est connu ou anticipé sur les effets du changement climatique, ainsi que sur les moyens potentiels pour en réduire les dits effets.

Ghislain de Marsily

---

<sup>1</sup><https://bit.ly/30efHIN>

<sup>2</sup><https://www.academie-sciences.fr/fr/Colloques-conferences-et-debats/changement-climatique.html>





---

Facing climate change, the range of possibilities / *Face au changement climatique, le champ des possibles*

# Réchauffement climatique : état des connaissances scientifiques, enjeux, risques et options d'action

*Global warming, state of scientific knowledge, challenges, risks and options for action*

Valérie Masson-Delmotte<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (CEA-CNRS-UVSQ),  
Institut Pierre Simon Laplace, Université Paris Saclay, Gif-sur-Yvette, France  
Courriel : [valerie.masson@lsce.ipsl.fr](mailto:valerie.masson@lsce.ipsl.fr)

**Résumé.** Cet article fait le point sur le changement climatique, sur la base de trois rapports spéciaux du GIEC publiés en 2018 et 2019. Ces rapports fournissent des évaluations intégrées à travers les différentes disciplines scientifiques, et, pour la première fois, sont rédigés par des scientifiques de différentes disciplines dans chaque chapitre. Ils font le point sur les changements observés et leurs causes, sur les opportunités et risques futurs, en fonction de l'évolution des émissions de gaz à effet de serre, des choix de développement socioéconomiques, et sur les solutions en matière d'action climat au service d'un développement soutenable, permettant de préserver la biodiversité, et de permettre à tous de vivre dignement.

Le premier rapport spécial SR15 (octobre 2018) porte sur les impacts associés à un réchauffement planétaire de 1,5 °C, ainsi que les trajectoires compatibles d'émissions de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la réponse au changement climatique, du développement soutenable et des efforts pour éradiquer la pauvreté : [www.ipcc.ch/report/SR15](http://www.ipcc.ch/report/SR15).

Le second rapport spécial SRCCL (août 2019) porte sur le changement climatique et l'utilisation des terres, et tout particulièrement la désertification et la dégradation des terres, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres : [www.ipcc.ch/report/SRCCL](http://www.ipcc.ch/report/SRCCL). Il aborde les défis liés à la fois à l'adaptation et l'atténuation.

Le troisième rapport spécial SROCC (septembre 2019) porte sur l'océan et la cryosphère dans un climat qui change. Il est centré sur la manière dont le changement climatique affecte l'océan et la cryosphère, les écosystèmes et les sociétés humaines, dans les régions de haute montagne, les régions polaires, pour le littoral, ce qui est lié à l'océan, y compris via les événements extrêmes et abrupts. Les options d'atténuation ne font pas partie de cette évaluation, sauf le « carbone bleu » (le potentiel des puits de carbone liés aux écosystèmes marins côtiers). Ce rapport souligne les enjeux de l'action pour renforcer la résilience : [www.ipcc.ch/report/SROCC](http://www.ipcc.ch/report/SROCC).

La présente synthèse fait le point sur les évolutions observées, leurs causes, sur les projections d'évolutions futures, en particulier en ce qui concerne leurs impacts et risques, en fonction des trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre à venir, et de nos choix collectifs.

**Abstract.** This article takes stock of climate change, based on three special IPCC reports published in 2018 and 2019. These reports provide integrated assessments across different scientific disciplines,

and for the first time are written by scientists from different disciplines in each chapter. They provide an update on observed changes and their causes, future opportunities and risks, depending on the evolution of greenhouse gas emissions, socio-economic development choices, and shed light on solutions for climate action and for sustainable development, preserving biodiversity and enabling everyone to live in dignity.

The first SR15 Special Report (October 2018) focuses on the impacts associated with a global warming of 1.5 °C, as well as compatible greenhouse gas emission trajectories, in the context of strengthening the response to climate change, sustainable development and efforts to eradicate poverty: [www.ipcc.ch/report/SR15](http://www.ipcc.ch/report/SR15).

The second SRCLL Special Report (August 2019) focuses on climate change and land use, particularly desertification and land degradation, sustainable land management, food security and greenhouse gas flows in terrestrial ecosystems: [www.ipcc.ch/report/SRCLL](http://www.ipcc.ch/report/SRCLL). It addresses the challenges of both adaptation and mitigation.

The third SROCC Special Report (September 2019) focuses on the ocean and cryosphere in an changing climate. It focuses on how climate change is affecting the ocean and the cryosphere, ecosystems and human societies, in high mountain areas, the regions polar, for the coastline, which is linked to the ocean, including via extreme and abrupt events. The mitigation options are not part of this assessment, except for “blue carbon” (the potential for carbon sinks linked to coastal marine ecosystems). This report highlights the challenges of action to building resilience: [www.ipcc.ch/report/SROCC](http://www.ipcc.ch/report/SROCC).

This summary takes stock of the trends observed, their causes, the projections of future changes, in particular with regard to their impacts and risks, depending on the future greenhouse gas emission trajectories, and our collective choices.

**Mots-clés.** Réchauffement climatique, Gaz à effet de serre, Evènements climatiques extrêmes, Paléoclimatologie, Adaptation, Atténuation, Durabilité.

Available online 14th December 2020

## 1. Introduction

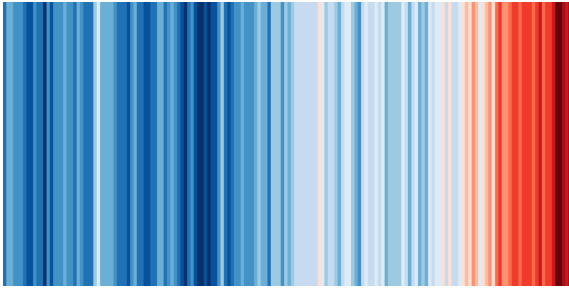
Les méthodes scientifiques et résultats résumés dans ce bref article sont issus d'un grand nombre de travaux de recherche et font suite au progrès des connaissances issu de la formidable aventure scientifique des sciences du climat. Ils reprennent les points clés de la conférence de 30 minutes donnée sur ce sujet lors du colloque de l'Académie des Sciences le 28 janvier 2020 (<https://www.youtube.com/watch?v=tDxD0gEArmK>), étayés par les références aux sources scientifiques des éléments abordés :

- le climat change, partout, avec des effets visibles;
- ce changement en cours est dû aux émissions passées et en cours de gaz à effet de serre;
- à court terme (à l'horizon 2050), nos choix peuvent réduire les risques liés à des évolutions climatiques inéluctables;
- les tendances à long terme (après 2050) vont dépendre radicalement des émissions de gaz à effet de serre à venir;
- de nombreuses options existent pour agir, pour gérer les risques, par l'adaptation, et pour réduire les émissions de gaz à effet de

serre tout en préservant la biodiversité et en permettant à chacun de vivre dignement.

Cet article présente brièvement une introduction aux sciences du climat (partie 2) puis les points clés des récents rapports spéciaux du GIEC<sup>1</sup> de 2018 et 2019 (partie 3). Ces rapports, rédigés par environ 300 chercheurs du monde entier, fournissent le meilleur état des connaissances, à partir de l'évaluation critique d'environ 20 000 publications scientifiques. La rigueur, l'exhaustivité et l'objectivité de cette évaluation ont bénéficié de la relecture critique effectuée par plusieurs milliers d'autres chercheurs, qui ont fourni plus de 70 000 commentaires de relecture sur les versions successives des rapports ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)). Chaque conclusion y est exprimée avec un niveau de confiance, établi sur la base de l'évaluation de la solidité des éléments scientifiques de connaissance et de leur cohérence, et est traçable aux publications scientifiques, techniques et socio-économiques, passées en revue de manière critique.

<sup>1</sup>Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, IPCC en anglais.



**FIGURE 1.** Cette représentation visuelle (<https://showyourstripes.info>) développée par le climatologue britannique Ed Hawkins dans le cadre d'une réflexion approfondie sur la manière de communiquer l'information scientifique auprès du grand public, qui permet intuitivement de visualiser le réchauffement planétaire observé entre 1850 et 2019 (environ 1 °C de plus qu'en 1850–1900) à la surface de l'océan et des continents, à partir du jeu de données HadCRUT4 [Morice et al., 2012] (<https://www.metoffice.gov.uk/hadobs/hadcrut4>). Cette visualisation est également disponible pour chaque pays. Chaque barre correspond à une année, et le code de couleur va du bleu au rouge sur une plage de  $-0,7$  à  $+0,7$  °C, et la valeur moyenne des années 1971–2000 est utilisée pour la transition des couleurs bleues aux couleurs rouges.

## 2. Des sciences du climat aux sciences du changement climatique

Nous observons de mieux en mieux, localement et par satellite, les caractéristiques d'un climat qui est en train de changer, caractérisé par un réchauffement de l'ordre de 1 °C observé à la surface de l'océan et des continents par rapport à la période 1850–1900, proche des conditions climatiques pré-industrielles (Figure 1). Les conséquences de ce réchauffement sont déjà visibles, en particulier par des événements extrêmes plus fréquents et plus intenses, affectant aussi bien les activités humaines que les écosystèmes terrestres et marins [IPCC, 2018]. Nous en comprenons de plus en plus les mécanismes. Cette compréhension est l'héritage de la construction graduelle de briques de base de la physique appliquée à ce système complexe, le système climatique, qui produit une variabilité intrinsèque, et qui réagit aux

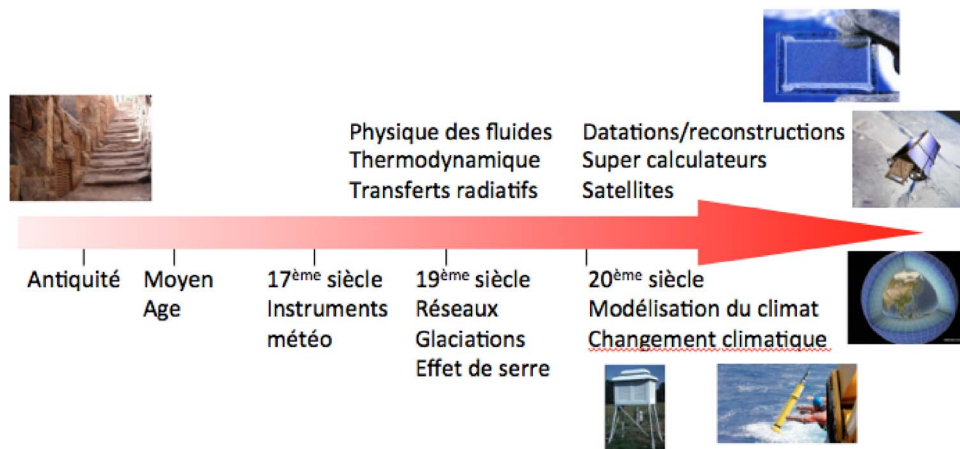
perturbations passées, présentes et futures du bilan d'énergie de la Terre (Figure 2).

Comme dans tous les domaines scientifiques, les sciences du climat reposent sur l'observation, la compréhension des mécanismes, la modélisation qui permet de comprendre comment ce système fonctionne [Edwards, 2013] (Figure 2). Je souligne que les tendances et caractéristiques climatiques observées au cours des derniers 30 ans avaient été correctement anticipées par les premières simulations couplées océan-atmosphère publiées dans les années 1980, par ex. [Stouffer and Manabe, 2017]. Enfin, ces modèles de climat jouent un rôle clé pour explorer les futurs possibles. Les sciences du changement climatique mobilisent de multiples disciplines scientifiques autour de la compréhension des impacts du changement climatique et des options d'action, pour la gestion de risque, l'adaptation, et l'atténuation, c'est-à-dire la baisse des émissions de gaz à effet de serre [Weart, 2013].

Premier élément pour cette image d'ensemble du changement climatique, les activités humaines perturbent très profondément la composition de l'atmosphère, présentée ici pour les derniers 2000 ans [Meinshausen et al., 2017] (Figure 3). L'augmentation de la teneur atmosphérique des principaux gaz à effet de serre dits « bien mélangés dans l'atmosphère » ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) résulte des émissions liées aux activités humaines et est en rupture en termes d'amplitude et de vitesse d'augmentation par rapport aux variations glaciaires-interglaciaires des derniers 800 000 ans [Köhler et al., 2017, Masson-Delmotte et al., 2013]. La concentration atmosphérique moyenne de  $\text{CO}_2$ , passée de l'ordre de 280 ppmv<sup>2</sup> pour le niveau pré-industriel, typique des périodes interglaciaires, à plus de 415 ppmv en juillet 2020 (selon les mesures de la NOAA, (<https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/global.html>), sort même de la plage estimée au cours des derniers 3,3 millions d'années, y compris au cours des périodes chaudes du Pliocène moyen [de la Vega et al., 2020].

En empêchant une partie du rayonnement infrarouge émis par la surface terrestre et les basses couches de l'atmosphère de partir vers l'espace, l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère conduit à un déséquilibre du

<sup>2</sup>ppmv : parts par million en volume.



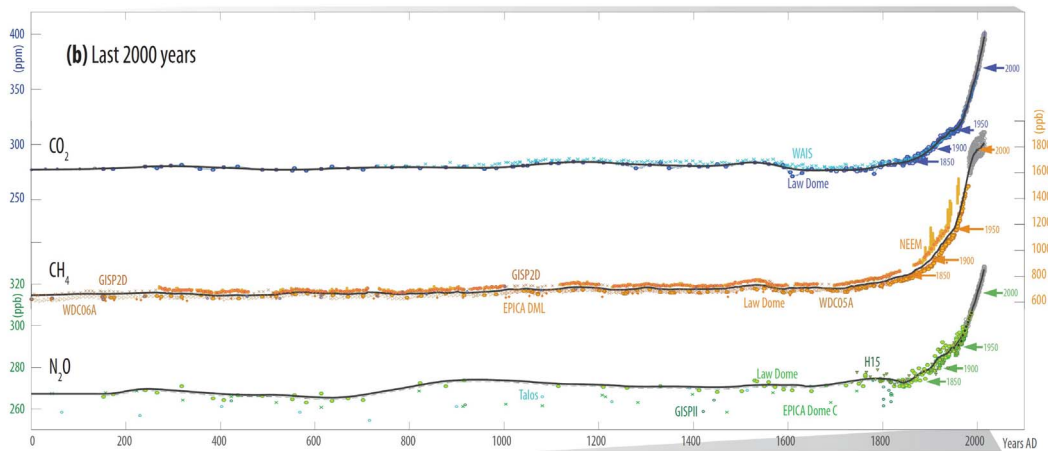
*Observer, comprendre les mécanismes, modéliser, explorer les futurs possibles*

**FIGURE 2.** Représentation schématisée d'étapes clés des progrès des connaissances en sciences du climat. La photographie de gauche représente les marches graduées qui permettaient de mesurer la hauteur des crues du Nil et ont fourni les premières observations quantitatives de la variabilité climatique. Depuis le XVII<sup>ème</sup> siècle, les développements des instruments de mesure, la structuration des réseaux d'observation (au départ pour la prévision météorologique) au-dessus des continents, à la surface de l'océan puis en profondeur, et enfin la télédétection depuis l'espace, à partir des années 1970, ont graduellement contribué à la construction d'un système internationalement coordonné d'observation du climat de la Terre (<https://gcos.wmo.int/>). Les sciences du climat ont également progressé par le progrès des connaissances en physique, appliquées pour comprendre le fonctionnement du système climatique formé de l'atmosphère, l'océan, la surface des continents, la biosphère, la cryosphère et leurs interactions, sa variabilité spontanée et sa réponse aux perturbations du bilan d'énergie de la Terre, d'un point de vue théorique et à l'aide d'outils de modélisation numériques, sur la base de principes physiques. Enfin, la caractérisation (datation, quantification) des variations passées du climat, avant les observations directes, grâce à l'étude des archives naturelles du climat (paléoclimatologie), la compréhension des mécanismes de ces variations passées, et leur utilisation pour tester les modèles de climat contribuent aussi au progrès des connaissances, en donnant accès à des « expériences naturelles » passées sur le climat de la Terre et en complétant les observations directes pour caractériser la variabilité naturelle du climat à des échelles de temps au-delà du siècle, et ainsi situer les changements observés actuellement dans le contexte de cette variabilité naturelle.

bilan radiatif de la Terre [Myhre et al., 2013]. L'effet réchauffant des gaz à effet de serre est en partie masqué par un effet refroidissant net, plus limité et associé à une plage d'incertitude plus importante, résultant de l'effet direct et indirect des aérosols. La perturbation du bilan d'énergie de la Terre résultant de l'effet des activités humaines conduit à une accumulation d'énergie dans le système climatique, compte tenu des rétroactions du système climatique [Sherwood et al., 2020]. La majeure partie de l'énergie supplémentaire emmagasinée dans le système climatique

(environ 93%) entre dans l'océan, dont la température de l'eau augmente, en surface et en profondeur. Une partie de cette énergie (environ 4%) est convertie en fonte de la cryosphère, conduisant à son recul (glace de mer arctique, manteau neigeux, glaciers, calottes de glace du Groenland et de l'Antarctique, dégel du pergélisol), une partie conduit au réchauffement des sols et de l'atmosphère (environ 3%); le réchauffement des basses couches de l'atmosphère ne représente qu'environ 1% de cette accumulation d'énergie (Figure 4).





**FIGURE 3.** Évolution de la concentration atmosphérique en CO<sub>2</sub> (bleu, ppm) ; CH<sub>4</sub> (orange, ppb) et N<sub>2</sub>O (ppb), à partir d'une compilation de mesures issues des carottes de glaces polaires et de mesures directes dans l'atmosphère [Meinshausen et al., 2017].

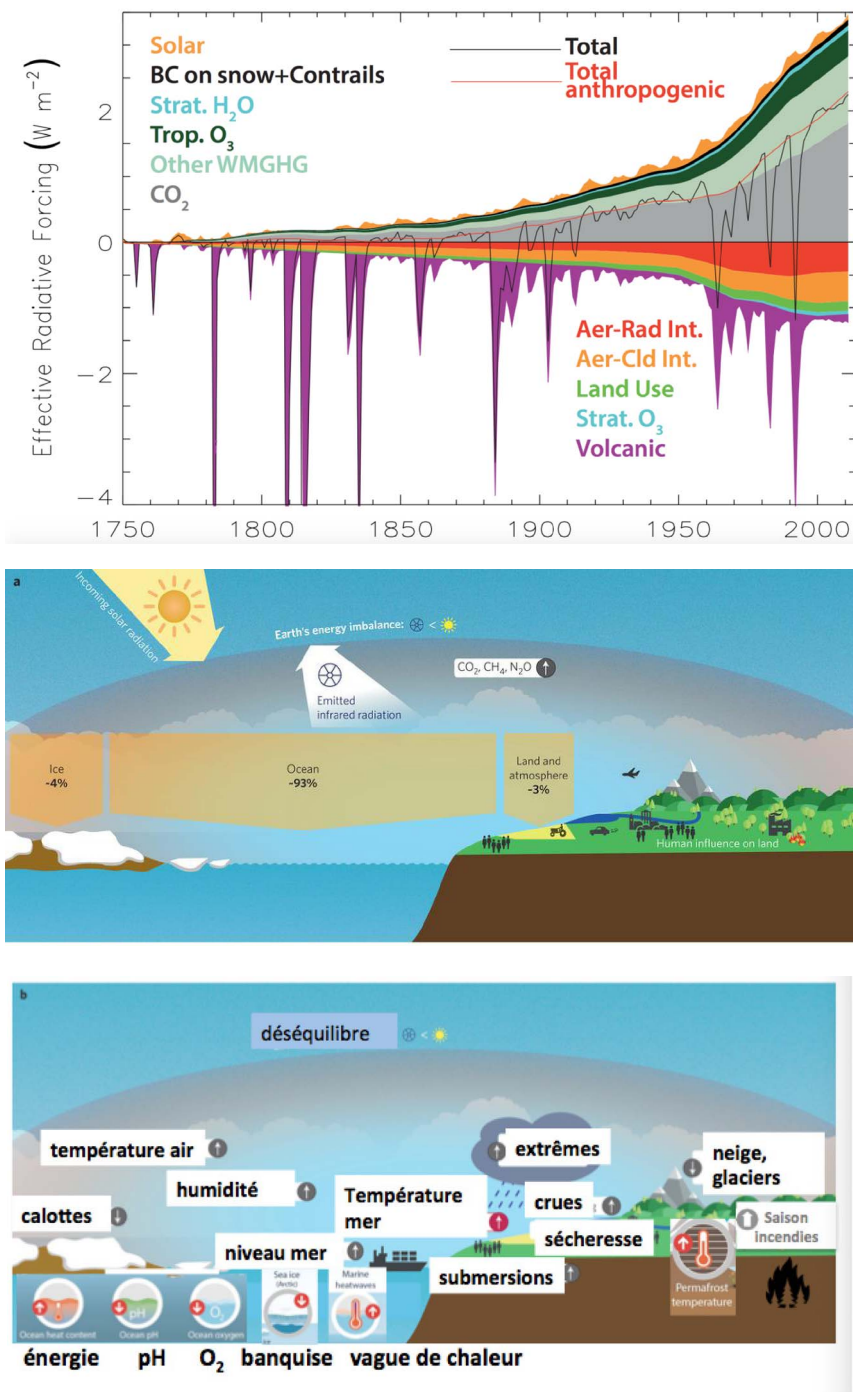
Il est difficile d'appréhender l'ordre de grandeur des changements profonds en cours dans le système climatique lorsqu'ils sont réduits à un indicateur tel que l'ampleur du réchauffement mesuré à la surface de l'océan et des continents. Du fait de l'augmentation de l'effet de serre et de la réponse du climat, l'augmentation du contenu de chaleur des premiers 2 km de l'océan [Cheng et al., 2020] entre 2018 et 2019 est de l'ordre de 25 ZJ<sup>3</sup> (Figure 5), soit environ 40 fois la quantité annuelle d'énergie primaire consommée par l'humanité [BP, 2020]. L'océan joue un rôle critique dans le fonctionnement du système climatique [IPCC, 2019b]. Du fait du temps de mélange des masses d'eau de l'océan, de l'ordre du millier d'années, ces masses d'eau plus chaudes vont restituer graduellement ce surplus d'énergie vers l'atmosphère. Cette accumulation de chaleur dans l'océan, de la surface en profondeur, rend le réchauffement climatique qui a déjà eu lieu irréversible à l'échelle de plusieurs siècles : il est impossible de revenir au climat pré-industriel.

Le réchauffement observé à la surface de la Terre est clairement dû à l'influence de l'homme sur le système climatique. L'effet des facteurs naturels externes seuls (activité du Soleil et des volcans) (Figure 4a) aurait conduit à un léger refroidissement

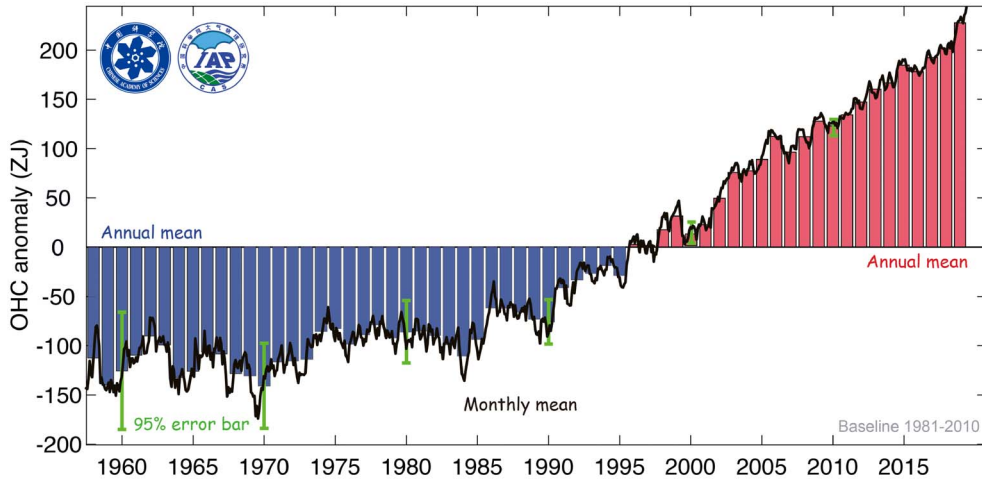
sur la seconde moitié du XX<sup>ème</sup> siècle. Le seul facteur qui explique à la fois l'ampleur du réchauffement observé en surface mais aussi l'ensemble de ses caractéristiques est la réponse du climat à l'augmentation de l'effet de serre due aux conséquences des activités humaines, en partie masqué par l'effet net refroidissant des particules également issues des activités humaines (aérosols). La Figure 6 illustre le résultat d'études d'attribution, sur la base de la compréhension physique et de la quantification du forçage radiatif et de la réponse du système climatique [Haustein et al., 2017]. La meilleure estimation de la fraction du réchauffement observé, due aux conséquences des activités humaines, est de 100%, avec une plage d'incertitude de 20% [IPCC, 2018].

Dans un climat qui change, les conditions météorologiques changent. La Figure 7 présente une représentation idéalisée (gaussienne) de la probabilité de distribution de la température pour une saison donnée et dans un endroit donné. Quand la température moyenne augmente, cette distribution se décale. Il y a toujours des extrêmes froids, mais plus rares, une forte augmentation de la récurrence d'extrêmes chauds (avec une augmentation d'intensité plus marquée que le réchauffement en moyenne planétaire), et de nouveaux records de chaleur, par exemple 42 °C en région parisienne et 46 °C dans le Sud de la France en 2019 [Vautard et al., 2020]. L'augmentation des extrêmes chauds est observée à

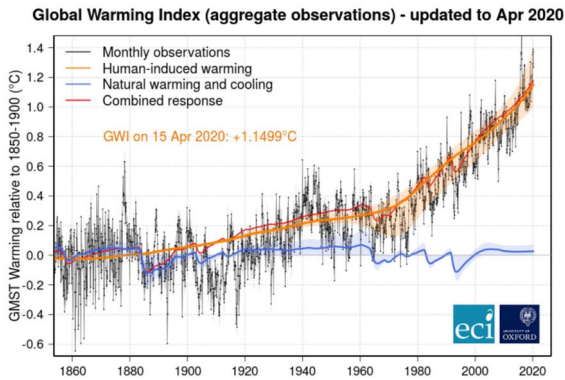
<sup>3</sup>ZJ : zettajoule, soit 10<sup>21</sup> J.



**FIGURE 4.** Représentations schématiques des flux et stockages d'énergie dans le système climatique et leurs conséquences. En haut, forçage radiatif (en W/m<sup>2</sup>); au milieu, déséquilibre du bilan d'énergie de la Terre résultant des activités humaines; en bas, conséquences de ce dernier. Adapté à partir de [von Schuckmann et al., 2016] combiné avec les points clés des récents rapports spéciaux du GIEC [IPCC, 2019b,a].

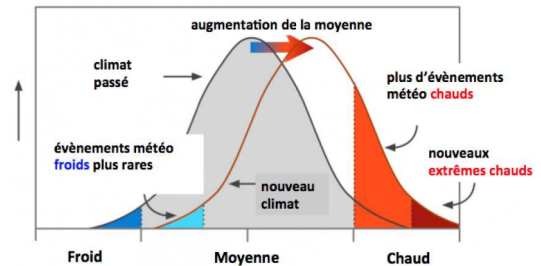


**FIGURE 5.** Estimation de l'évolution du contenu de chaleur de l'océan sur ses premiers 2000 m de profondeur, exprimé en  $ZJ^3$ , et représenté en différence (anomalie) par rapport à la période 1981–2010, à l'échelle mensuelle (noir) et annuelle (barres verticales); les barres d'erreur vertes indiquent l'évolution de l'incertitude (à 95%) qui s'est réduite au cours du temps grâce à l'amélioration du réseau de mesure océanographique [Cheng et al., 2020].



**FIGURE 6.** Illustration de l'analyse du réchauffement climatique dû aux conséquences des activités humaines, par rapport à 1850–1900, à partir d'une méthode standard de détection et attribution [Haustein et al., 2017]. Cet indice estime les contributions au réchauffement observé (4 jeux de données, anomalies mensuelles), après suppression des variations inter-annuelles par un ajustement aux moindres carrés, et les réponses aux forçages issues de l'émulateur développé dans le chapitre 8 du rapport AR5 du WGI du GIEC. L'ampleur de ces réponses est estimée par l'ajustement aux observations (<https://globalwarmingindex.org>).

Probabilité d'avoir différentes températures chaque jour



**FIGURE 7.** Représentation schématique des relations entre augmentation de la température moyenne pour un endroit donné, et modification de l'occurrence et l'intensité d'évènements froids et chauds, pour une fonction de distribution de probabilité journalière inchangée [IPCC, 2013].

la surface de l'ensemble des continents [IPCC, 2018] ainsi que dans l'océan, avec des vagues de chaleur marines également plus fréquentes, plus intenses et plus longues [IPCC, 2019b].

Le changement climatique décrit donc un ensemble de manifestations qui sont les conséquences du déséquilibre du bilan d'énergie de la Terre (Figure 4b), avec une intensification des extrêmes

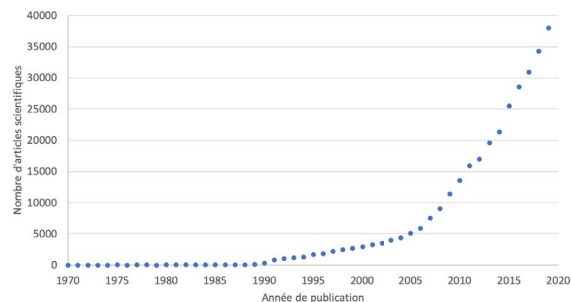
comme les vagues de chaleur et l'intensité des pluies torrentielles, favorisées dans une atmosphère plus chaude, qui peut contenir davantage de vapeur d'eau, l'intensification des sécheresses dans de nombreuses régions, comme le pourtour de la Méditerranée, une augmentation des situations météorologiques propices aux incendies de forêt, une augmentation du niveau moyen des mers, du fait de l'expansion volumique thermique de l'océan qui se réchauffe en surface et en profondeur et de la fonte des glaces continentales, conduisant à une augmentation des phénomènes de submersions côtières. Cela comprend aussi un réchauffement de sols gelés entraînant leur dégel en surface, un recul de l'enneigement au printemps dans l'hémisphère nord, un recul de l'extension de la glace de mer arctique.

### 3. De la production de connaissances à l'évaluation de l'état des connaissances

Nous sommes dans une situation où la communauté scientifique s'est approprié cet enjeu du changement climatique, dans toutes les disciplines scientifiques, aussi bien dans les sciences du climat, abordées précédemment, pour comprendre le fonctionnement du système climatique et les évolutions futures physiquement possibles, mais aussi pour comprendre les impacts et les risques potentiels du changement climatique, pour les écosystèmes, les secteurs d'activité, et les sociétés humaines, dans les différentes régions du monde, et enfin pour explorer les options d'action, pour la gestion de risque, pour l'adaptation, et pour réduire les rejets de gaz à effet de serre, tout en assurant un développement soutenable. Une recherche dans les bases de données internationales des publications dans les journaux à comité de lecture montre plus de 20 000 publications scientifiques annuelles avec le mot clé « climat » (Figure 8).

Cela justifie d'autant plus le fait d'avoir un effort collégial, international, pour passer en revue ce corpus de connaissances scientifiques, et évaluer ce qui est robuste, solidement établi, qui résiste à l'examen critique; ce qui est émergent, potentiellement important pour éclairer des choix; les raisons de controverses scientifiques, du fait de connaissances partielles ou incohérentes; et les limites des connaissances scientifiques.

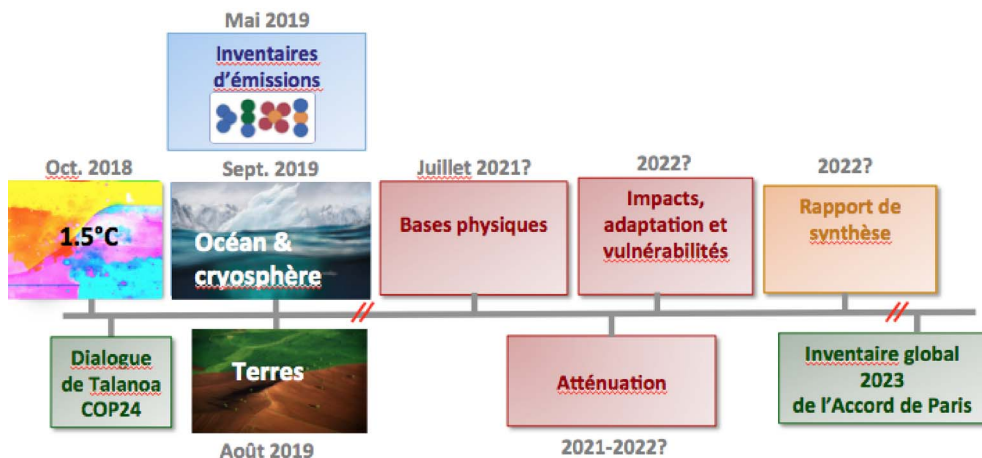
C'est le mandat du GIEC, le Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat ([www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)), mis en place en 1988 dans le cadre du Programme des Nations Unies pour l'Environnement et l'Organisation Météorologique Mondiale [Jouzel et al., 2018]. Le GIEC ne produit pas de connaissances, mais évalue l'état des connaissances sur la base des éléments disponibles dans la littérature scientifique, technique et socio-économique. Les rapports spéciaux sont rédigés chacun par une centaine d'auteurs des différentes régions du monde (plus de 200 auteurs pour les rapports complets de chaque groupe de travail), et font l'objet de plusieurs étapes de relecture mobilisant des milliers de relecteurs. Cette relecture critique est un aspect essentiel pour la qualité de l'évaluation, son objectivité, sa rigueur, sa robustesse et sa transparence. En ce sens, les rapports du GIEC contribuent également à la maturation des connaissances scientifiques, et le GIEC a également joué un rôle dans la montée en puissance de l'intégration des connaissances issues de multiples disciplines scientifiques [Weart, 2013].



**FIGURE 8.** Nombre de publications scientifiques parues chaque année dans les journaux à comité de lecture avec le mot clé « climate change » (recherche faite sur Web of Science, octobre 2020).

Pour le 6<sup>ème</sup> cycle d'évaluation (AR6), démarré en 2015, le GIEC a examiné plus de 30 propositions de thématiques et choisi de préparer trois rapports spéciaux transverses à deux ou trois de ses groupes de travail (bases physiques; impacts, adaptation et vulnérabilité; atténuation), rendus en 2018 et 2019 (Figure 9), ce qui représente un effort sans précédent en matière d'intégration et en matière de thématiques spécifiques abordées de manière transverse.

Au moment de la rédaction de cet article, la préparation des rapports principaux des groupes de travail du GIEC est en cours, mobilisant les auteurs



**FIGURE 9.** Ensemble de rapports préparés dans le cadre du 6<sup>ème</sup> cycle d'évaluation du GIEC (AR6). Les dates d'approbation des rapports principaux de chaque groupe de travail ont été décalées à cause des délais liés à la pandémie de COVID-19 [Tollerson, 2020] et peuvent encore être amenées à être révisées.

des rapports de manière virtuelle (230 auteurs de 60 pays pour le Groupe 1), avec des délais anticipés de l'ordre de 4 mois pour la finalisation des rapports, du fait des difficultés liées à la pandémie de COVID-19 affectant la communauté scientifique, ainsi que les centaines d'auteurs et les milliers de relecteurs des rapports [Tollerson, 2020].

La suite de cet article présente de manière synthétique les points clés de ces trois rapports spéciaux de 2018 et 2019. Le lecteur est invité, pour plus de précisions et de profondeur, à prendre connaissance de ces rapports, où chaque conclusion est exprimée avec un niveau de confiance, et est traçable à l'analyse des éléments scientifiques dans les publications examinées, dans les différentes sections des chapitres. Enfin, chaque chapitre comporte une analyse des verrous scientifiques et des limites des connaissances, qui ne sont pas discutés ici mais constituent, à mon sens, une valeur ajoutée formidable qui, en creux, dessine des voies de recherche essentielles.

#### 4. Points clés du rapport spécial du GIEC sur 1,5 °C

Ce rapport, préparé pour la première fois de manière transverse aux trois groupes de travail du GIEC, porte sur *les impacts d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C au-dessus du niveau pré-industriel et sur*

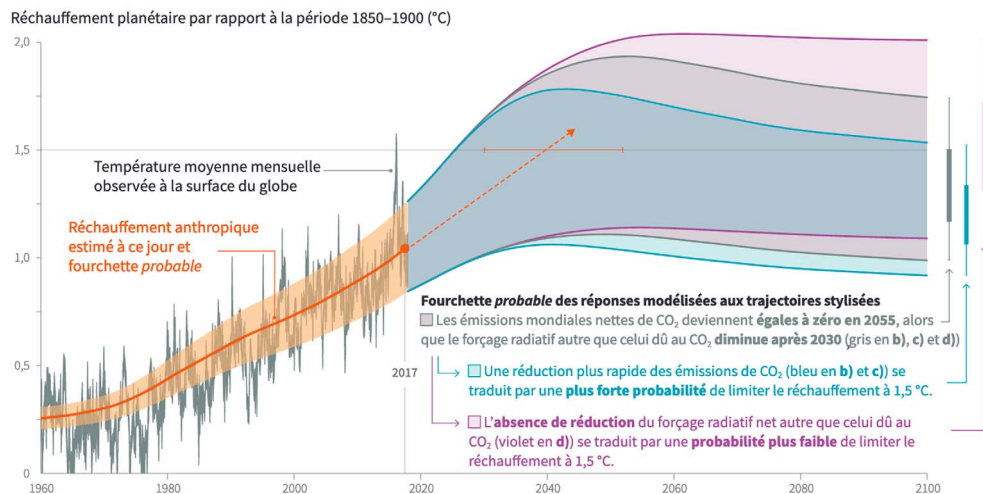
*les trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre correspondantes, dans le contexte du renforcement de la réponse globale aux menaces du changement climatique, du développement soutenable, et des efforts pour éradiquer la pauvreté.* L'ensemble du rapport est disponible en anglais ([www.ipcc.ch/sr15](http://www.ipcc.ch/sr15)) ainsi qu'une traduction en français de certains éléments (résumé technique, résumé pour décideurs, FAQs, glossaire; voir dans la rubrique « download report », en bas de page « UN and other languages »).

Je résume ce rapport en indiquant que chaque demi-degré de réchauffement compte, en matière de caractéristiques et d'impacts du changement climatique; chaque année compte, en matière d'émissions de gaz à effet de serre, compte tenu de la faible marge de manœuvre qui reste si l'on veut contenir le réchauffement à un niveau proche de l'actuel; et chaque choix compte, car c'est un rapport qui inscrit profondément la réflexion sur les options d'actions vis-à-vis du climat dans toutes les dimensions d'un développement soutenable, et tout particulièrement l'élimination de l'extrême pauvreté, le premier objectif du développement durable, ainsi que les perspectives croisées entre climat et biodiversité.

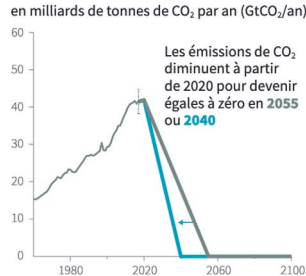
Préparé suite à l'invitation de la COP21, ce rapport spécial passe en revue près de 6 000 publications scientifiques (dont beaucoup de travaux publiés entre 2016 et 2018), et a bénéficié de plus de



a) Variation de la température mondiale observée et réponses modélisées à des trajectoires stylisées des émissions et du forçage anthropiques

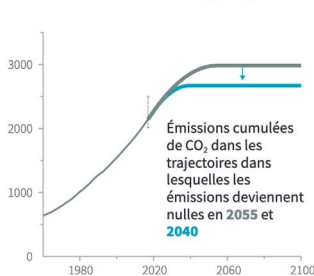


b) Trajectoires stylisées des émissions mondiales nettes de CO<sub>2</sub> en milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> par an (GtCO<sub>2</sub>/an)



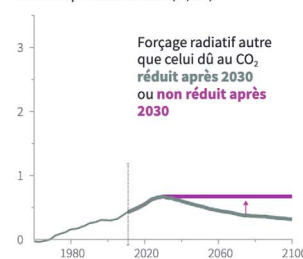
Une réduction immédiate plus rapide des émissions de CO<sub>2</sub> limite les émissions cumulées de CO<sub>2</sub>, présentées dans le graphique c).

c) Émissions nettes cumulées de CO<sub>2</sub> en milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> (GtCO<sub>2</sub>)



La hausse maximale de la température est déterminée par les émissions nettes cumulées de CO<sub>2</sub> et par le forçage radiatif net autre que celui dû au CO<sub>2</sub> (dû au méthane, au protoxyde d'azote, aux aérosols et aux autres facteurs de forçage anthropiques).

d) Trajectoires du forçage radiatif autre que celui dû au CO<sub>2</sub> en watts par mètre carré (W/m<sup>2</sup>)



**FIGURE 10.** Le pic de réchauffement futur dépendra du cumul des émissions de CO<sub>2</sub> et du forçage radiatif non CO<sub>2</sub>. En haut, réchauffement observé (anomalies pour chaque mois, en gris, par rapport à 1850–1900, moyenne de 4 jeux de données) et fraction attribuée à l'influence humaine (en rouge, meilleure estimation, et plage d'incertitude de 20% en orange; à noter que le réchauffement dû aux activités humaines est déterminé sur une période de 30 ans centrée sur l'année concernée, et est calculé jusqu'en 2017; qu'il se poursuivra au rythme moyen récent de 0,2 °C par décennie. En pointillés, estimation du moment où ce réchauffement dû aux activités humaines atteindrait 1,5 °C au rythme actuel de réchauffement, soit entre environ 2030 et 2050 (barre horizontale). Les panaches de couleur représentent différentes trajectoires théoriques de stabilisation du réchauffement autour de 1,5 °C tenant compte de la variabilité du climat et de sa réponse aux perturbations du bilan d'énergie de la Terre, pour une trajectoire (en gris) idéalisée de diminution linéaire des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> vers le net zéro (en bas, à gauche) et une baisse du forçage radiatif non CO<sub>2</sub> (en bas, à droite). Le panache bleu représente le résultat d'une baisse encore plus radicale des émissions de CO<sub>2</sub> (net zéro en 2040) et illustre les différences en cumul d'émissions de CO<sub>2</sub>. Le panache violet représente le résultat de la trajectoire en gris pour le CO<sub>2</sub> et d'un plateau et non d'une baisse du forçage radiatif non CO<sub>2</sub> [IPCC, 2018].

42 000 commentaires de 1 113 relecteurs ([www.ipcc.ch/report/SR15](http://www.ipcc.ch/report/SR15)).

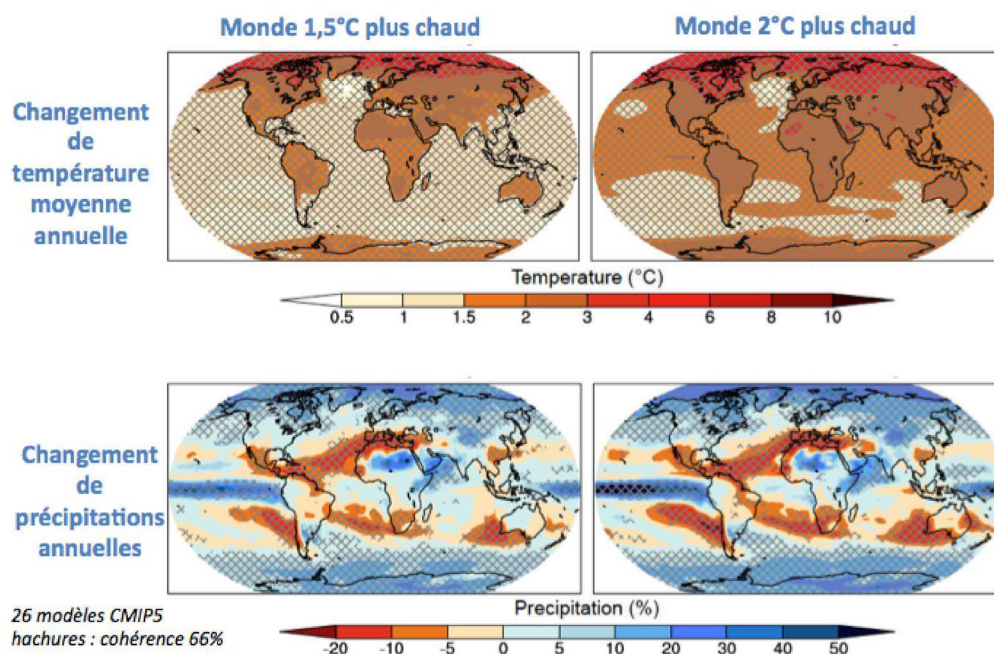
Au rythme actuel du réchauffement (+0,2 °C par décennie), le réchauffement atteindra, au sens

climatique (en moyenne sur 30 ans ici) un niveau de 1,5 °C de plus qu'en 1850–1900, entre environ 2030 et 2050 (plus tôt si le forçage radiatif anthropique est plus important et si le climat réagit fort, plus tard dans les situations opposées) (Figure 10). La question posée au GIEC a été d'évaluer les conditions permettant de stabiliser le réchauffement à 1,5 °C. La première condition clé est une forte baisse des émissions mondiales de CO<sub>2</sub>, qui sont passées de l'ordre de 15 à 40 milliards de tonnes par an de 1970 à aujourd'hui, jusqu'à atteindre le net zéro, c'est-à-dire que les émissions anthropiques résiduelles soient compensées par des éliminations anthropiques, c'est-à-dire des actions mises en œuvre pour extraire le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère et le stocker de manière durable). Plus cette baisse est précoce et rapide, plus le cumul des émissions passées, présentes et futures de CO<sub>2</sub> sera bas, et plus le niveau de réchauffement, au moment de la stabilisation, sera bas. Tant que les émissions nettes de CO<sub>2</sub> ne sont pas nulles, le climat continuera à dériver. La seconde condition est de stabiliser ou réduire le forçage radiatif dû aux facteurs non CO<sub>2</sub> (autres gaz à effet de serre, aérosols, usage des terres). Plus ce facteur est réduit, conjointement avec l'atteinte de la neutralité CO<sub>2</sub>, et plus la probabilité de pouvoir contenir le réchauffement à un niveau bas augmente. De nombreux facteurs climatiques de courte durée de vie, qui agissent sur le climat ont aussi un effet sur la qualité de l'air. C'est le cas par exemple du méthane qui est un précurseur de la formation d'ozone troposphérique, mais aussi d'autres gaz à effet de serre réactifs, ou des suies de carbone. Réduire les émissions de ces composés apporte ainsi des bénéfices importants et rapides pour la santé publique et pour les écosystèmes via l'amélioration de la qualité de l'air.

Quelles sont les caractéristiques d'un monde plus chaud de 1,5 °C ou 2 °C? Plus le niveau moyen de réchauffement planétaire augmente, et plus le niveau de réchauffement en moyenne annuelle augmente dans les différentes régions du monde, avec un réchauffement plus important à la surface des continents qu'en surface de l'océan et particulièrement prononcé dans la région arctique, du fait de processus amplificateurs (Figure 11). De même, un niveau plus important de réchauffement conduit à des projections de modifications de la pluviométrie annuelle plus importantes dans chaque région, avec une augmentation des précipitations dans les régions froides

et une baisse nette, déjà observée, dans les régions de climat méditerranéen, tout particulièrement tout autour de la mer Méditerranée, où l'aléa sécheresse a augmenté et augmentera très nettement pour chaque demi-degré de réchauffement planétaire supplémentaire (Figure 12). Enfin, dans un climat qui se réchauffe, on projette une intensification des événements extrêmes, comme l'intensité des pluies torrentielles, déjà observée dans le Sud de la France [Luu et al., 2018], une augmentation du nombre de jours très chauds, une augmentation de l'intensité des extrêmes chauds (plus importante que celle du niveau moyen de réchauffement), amplifiée dans les villes du fait de l'effet d'îlot de chaleur urbain. Ces augmentations de l'intensité, de la fréquence et de la durée des épisodes chauds conduisent à la dégradation d'écosystèmes, comme les récifs de coraux tropicaux, affectent négativement les rendements des céréales et la productivité du bétail, ce qui montre les liens étroits entre climat et sécurité alimentaire.

Pour résumer une analyse de risque prenant en compte les aléas climatiques, les expositions, les vulnérabilités et les options d'adaptation, les rapports du GIEC utilisent une représentation synthétique de l'évolution du niveau de risque d'impacts en fonction du niveau de réchauffement planétaire. Entre un monde 1 °C, 1,5 °C et 2 °C plus chaud, le niveau de risque lié au climat augmente nettement pour un certain nombre de systèmes naturels et humains (Figure 13). Ainsi, on estime que 70 à 90% des récifs de coraux tropicaux seront sévèrement dégradés du fait de la récurrence des phénomènes de blanchiment liés aux vagues de chaleur marines, pour un réchauffement de 1,5 °C, et la quasi-totalité d'entre eux pour un réchauffement de 2 °C. Les enjeux sont également importants pour l'Arctique, où le recul de l'extension de la glace de mer se poursuivra en fonction de l'intensité du réchauffement planétaire, conduisant à un océan arctique libre de glace en fin d'été, environ une année sur 100 dans un monde 1,5 °C plus chaud, et une année sur 10 à une année sur 3 dans un monde 2 °C plus chaud, affectant les écosystèmes et les modes de vie qui dépendent de la glace de mer. Sur la base d'une analyse d'environ 100 000 espèces de plantes, d'insectes, et d'invertébrés, il est évalué que le nombre d'espèces qui risquent de perdre leur habitat double entre un réchauffement de 1,5 °C et 2 °C, ce qui souligne les liens étroits entre la maîtrise



**FIGURE 11.** Structure spatiale du changement de température en moyenne annuelle (°C, en haut) et du pourcentage de changement de la quantité annuelle des précipitations (% en bas) projetés dans les modèles de climat CMIP5 pour un niveau de réchauffement respectif de 1,5 °C (à gauche) et 2 °C (à droite) au-dessus de 1850–1900 [IPCC, 2018].

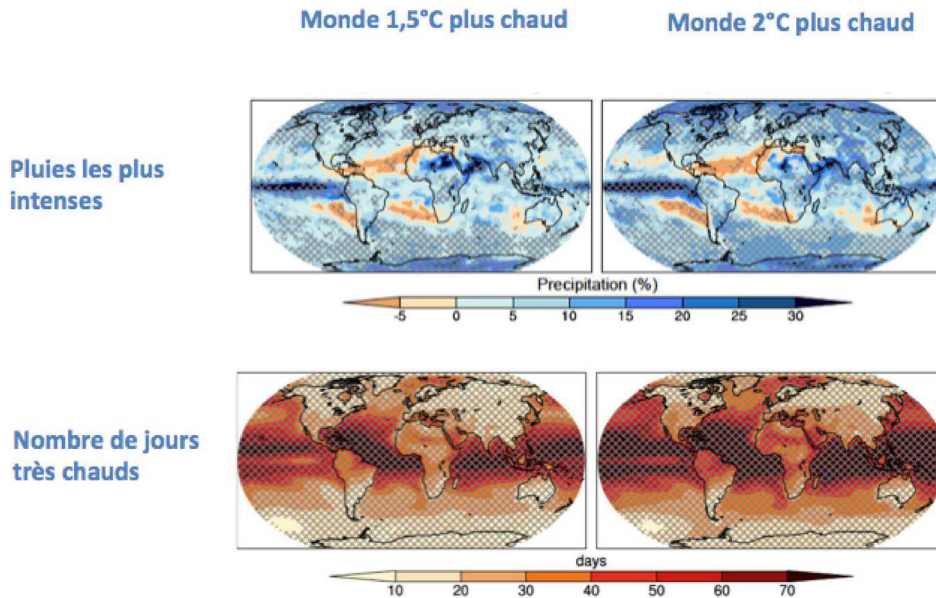
du niveau de réchauffement et la préservation des écosystèmes et de la biodiversité (en plus des enjeux liés aux pressions locales sur ceux-ci). Si la montée du niveau des mers est inéluctable sur plusieurs siècles, du fait de l'inertie de la réponse de l'océan, des glaciers et des calottes du Groenland et de l'Antarctique, limiter le réchauffement à 1,5 °C par rapport à 2 °C permettrait de limiter son rythme au cours du XXI<sup>ème</sup> siècle et son ampleur au-delà, et donc de gagner de la marge de manœuvre pour l'adaptation sur les littoraux.

Par ailleurs, les risques ne sont pas équitablement répartis, et sont disproportionnellement plus élevés pour l'Arctique, les zones semi-arides et de climat méditerranéen, les petits états insulaires en développement et les pays les moins avancés. Agir pour contenir l'ampleur du réchauffement climatique à 1,5 °C plutôt qu'à 2 °C permettrait d'éviter d'exposer à des risques climatiques croissants plusieurs centaines de millions de personnes, susceptibles de basculer dans la pauvreté. Il existe évidemment une large gamme d'options d'adaptation qui permet

d'agir sur les caractéristiques de certains aléas, sur l'exposition et la vulnérabilité par rapport aux aléas climatiques. Les besoins d'adaptation augmentent avec l'ampleur du réchauffement à venir, et il existe, tant pour les écosystèmes que pour les sociétés humaines, des limites aux capacités d'adaptation, même pour un réchauffement de l'ordre de 1,5 °C. Il y a un manque de connaissances sur le coût de l'adaptation, ses potentiels et ses limites, dans beaucoup de régions, et pour beaucoup de secteurs d'activité. Ce rapport souligne les liens étroits entre niveau de réchauffement, sécurité humaine, et enjeux de développement.

Quelles sont les trajectoires d'émissions de CO<sub>2</sub> permettant de contenir le réchauffement à un niveau aussi proche de l'actuel que 1,5 °C ou 2 °C? Pour stabiliser le réchauffement à 1,5 °C (ou 2 °C), sur la base des connaissances évaluées dans ce rapport (qui datent de 2018), il faudrait respectivement diminuer les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> de 50% (25%) entre 2010 et 2030, et atteindre le net zéro à horizon 2050 (2100) (Figure 14).

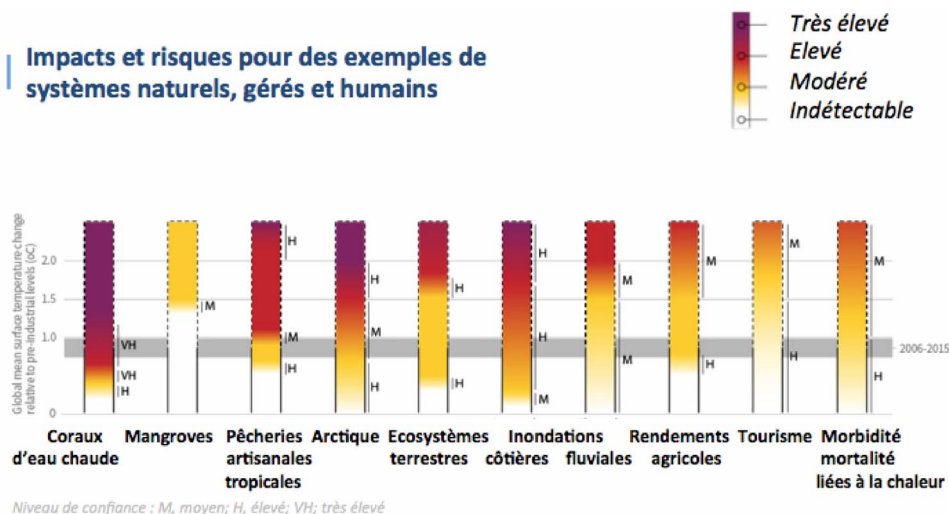




**FIGURE 12.** Structure spatiale du pourcentage de changement de la quantité de précipitations correspondant aux évènements les plus intenses 5 jours de suite chaque année (% , en haut) et du changement de nombre de jours très chauds par an (les 10% les plus chauds pour la période de référence pré-industrielle, en bas) projetés dans les modèles de climat CMIP5 pour un niveau de réchauffement respectif de 1,5 °C (à gauche) et 2 °C (à droite) au-dessus de 1850–1900 [IPCC, 2018].

Cela demanderait des transitions à une échelle sans précédent historique, dans tous les secteurs d'activité, l'énergie, en premier lieu, avec le fait de décarboner la production d'électricité, électrifier les usages finaux de l'énergie, décarboner les transports; des changements profonds dans l'utilisation des terres pour qu'au lieu d'émettre des gaz à effet de serre, les activités agricoles renforcent le stockage de carbone dans les sols et préservent et renforcent les puits de carbone naturels; des transformations dans la manière de penser les villes pour les rendre plus résilientes dans un climat qui change, maximiser l'efficacité énergétique et toutes les options disponibles à l'échelle des villes, comme les mobilités douces et les transports en commun; renforcer l'efficacité énergétique et l'économie circulaire dans le secteur industriel; mettre en place les infrastructures au service de ces transitions. Il existe une large palette de technologies disponibles aujourd'hui, permettant d'agir sur les modes de production. Mais la vitesse de la baisse d'émissions compatibles avec une stabilisation du réchauffement à 1,5 °C demande aussi de maîtriser la demande, avec

des changements des modes de consommation et de comportements, pour permettre la transformation rapide des systèmes de production. Les conditions sine qua non pour contenir le réchauffement à un niveau bas comprennent une diminution très rapide de l'utilisation du charbon dans le monde et une réorientation des investissements depuis le secteur des énergies fossiles vers les options bas carbone et l'efficacité énergétique, multipliées par 5 à 6 d'ici à 2050 (Figure 13). La plupart des trajectoires compatibles avec une stabilisation du réchauffement proche de 1,5 °C impliquent, après l'atteinte du net zéro CO<sub>2</sub>, des émissions net négatives. Plus les émissions tardent à diminuer rapidement, plus le réchauffement risque de dépasser 1,5 °C, avec des conséquences potentielles en matière de pertes irréversibles d'écosystèmes, et des gestions de crise de plus en plus difficiles, en particulier du fait d'évènements extrêmes plus intenses et plus fréquents. Cela impliquerait également que les jeunes générations d'aujourd'hui soient capables de déployer, d'ici à la moitié de ce siècle et au-delà, des éliminations d'émissions de gaz à effet de serre



**FIGURE 13.** Exemples de changements de niveau d'impacts et risques d'impacts pour des exemples de systèmes naturels, gérés et humains, pour différents niveaux de réchauffement planétaire; le degré de confiance est indiqué par les lettres, et le code de couleur passe de blanc à violet entre un risque indétectable, modéré, élevé ou très élevé [IPCC, 2018].

colossales, pour revenir d'ici 2100, après un dépassement transitoire de ces émissions, au niveau de réchauffement souhaité. Certaines options permettant d'éliminer le CO<sub>2</sub> de l'atmosphère pour le stocker de manière durable, comme l'utilisation à grande échelle de l'énergie de la biomasse avec captage et stockage du CO<sub>2</sub>, présentent des points de vigilance importants compte tenu de la pression supplémentaire sur l'utilisation des terres, et des enjeux croisés liés à la sécurité alimentaire et la préservation de la biodiversité.

Ce rapport spécial du GIEC sur 1,5 °C souligne les enjeux croisés de l'action pour le climat et les différentes dimensions d'un développement soutenable, en mettant l'accent sur des transitions éthiques et justes, qui protègent les plus vulnérables. Il montre qu'il existe, dans chaque contexte, différentes trajectoires qui présentent différentes synergies ou compromis avec les autres objectifs du développement durable. Un ensemble intelligemment choisi de mesures pour s'adapter et réduire les émissions peut permettre d'atteindre les objectifs du développement durable, avec les bénéfices les plus larges identifiés dans les trajectoires agissant sur la demande (sobriété énergétique, sobriété sur l'empreinte en matériaux non renouvelables, alimentation saine et bas carbone). Enfin, ce rapport analyse les conditions

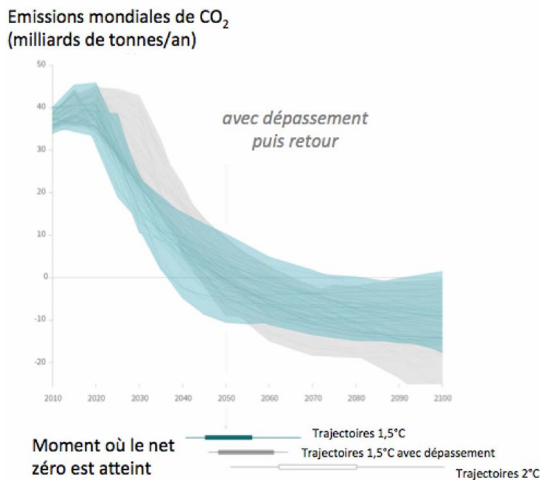
clés de faisabilité, qui comprennent la coopération, la gouvernance à toutes les échelles, l'innovation technologique, sociale et frugale, la mobilisation des financements. Je souligne également l'importance de l'éducation et de la formation, qui font partie des conditions nécessaires (mais souvent pas suffisantes) pour permettre la mise en place de telles transformations.

## 5. Points clés du rapport spécial du GIEC sur l'utilisation des terres émergées

Ce rapport, préparé de manière transverse aux 3 groupes de travail du GIEC, pour la seconde fois, porte sur le changement climatique, la désertification, la dégradation des terres, la gestion durable des terres, la sécurité alimentaire, et les flux de gaz à effet de serre dans les écosystèmes terrestres.

L'ensemble du rapport est disponible en anglais ([www.ipcc.ch/srcc1](http://www.ipcc.ch/srcc1)) ainsi qu'une traduction en français de certains éléments (résumé technique, résumé pour décideurs, FAQs, glossaire; voir dans la rubrique « download report », en bas de page « UN and other languages »).

Ce rapport s'appuie sur l'évaluation d'environ 7000 publications, et a reçu plus de 28 000 commentaires de relecture.



**FIGURE 14.** Caractéristiques des trajectoires d'émissions mondiales de CO<sub>2</sub>, issues de modèles d'évaluation économique à moindre coût et compatibles avec une stabilisation du réchauffement à 1,5 °C (50% de probabilité) avec dépassement limité (bleu) ou dépassement atteignant 0,3 °C puis retour (en gris) et analyse de l'atteinte de la neutralité carbone dans ces trajectoires. A titre de comparaison, la même analyse pour 2 °C (66% de probabilité) de réchauffement est présentée en bas du graphique [IPCC, 2018].

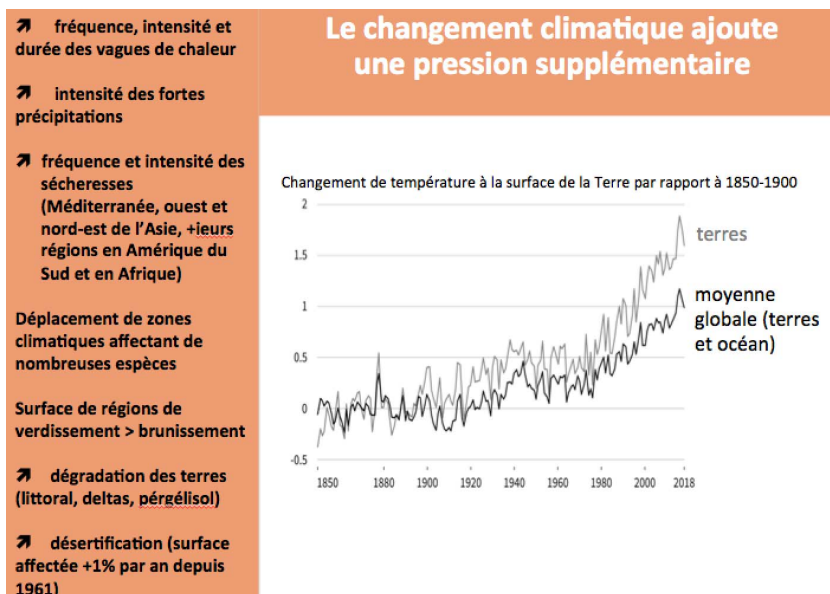
Nous dépendons des terres émergées pour notre alimentation, pour les fibres, l'énergie, notre santé, notre bien-être, notre identité culturelle. Ce sont des ressources critiques sous pression croissante, et le changement climatique ajoute à ces pressions. Une gestion durable des terres porte des solutions extrêmement importantes, mais ne peut pas tout faire, et ne peut pas se substituer à une baisse des émissions de gaz à effet de serre dans les autres secteurs d'activité.

Voici quelques chiffres clés. Nous utilisons actuellement 70% des terres émergées libres de glace. Nous récoltons près d'un quart à un tiers de la productivité primaire potentielle sur les continents. 1/4 des terres sont dégradées du fait des conséquences des activités humaines. Près de 500 millions de personnes vivent dans des zones affectées par la désertification, et la surface des zones semi-arides en situation de sécheresse a augmenté en moyenne de 1%

par an depuis 1960. Nos choix alimentaires pèsent de plus en plus en termes de dégradation d'écosystèmes et de perte de biodiversité. La consommation par personne d'huiles végétales ou de viande a doublé par habitant depuis 1960, en plus de l'augmentation de la population mondiale. Le système alimentaire mondial est non soutenable. Environ 820 millions de personnes souffrent toujours de la faim, malgré les progrès en matière de rendements agricoles, et ce nombre a augmenté récemment. En même temps, environ 2 milliards de personnes souffrent de surpoids ou d'obésité, avec un coût croissant en matière de santé publique. Le système alimentaire, dans son ensemble, représente 1/3 des émissions mondiales de gaz à effet de serre, et il est vulnérable par rapport aux conséquences du changement climatique.

Il existe de nombreuses solutions disponibles dès maintenant pour agir, en éliminant les pertes et le gaspillage alimentaire, en transformant les modes de production, de transformation et de consommation, avec des intersections majeures en matière de santé publique et d'environnement, en préservant, restaurant et renforçant les puits de carbone. En matière de boisement (afforestation sur des zones précédemment cultivées) et l'utilisation à grande échelle de cultures pour produire de la biomasse pour l'énergie, il existe un potentiel théorique limité de renforcement des puits de carbone, à condition que cela s'intègre dans une gestion durable des terres. Enfin, il existe des options importantes d'action en matière de gestion de risque dans ce secteur (assurances, gestion intégrée de l'eau, gestion des incendies).

Le réchauffement, plus prononcé au-dessus des continents qu'en moyenne mondiale, atteint dès aujourd'hui 1,5 °C de plus qu'en 1850–1900 (Figure 15). L'état des terres est affecté par l'augmentation de la fréquence, de l'intensité et la durée des vagues de chaleur, l'augmentation de l'intensité des fortes précipitations, de la fréquence et de l'intensité des sécheresses dans de nombreuses régions, conduisant à l'observation par satellites de zones de « brunissement », dont la surface est inférieure aux zones de « verdissement », du fait de l'augmentation de la teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub> et d'un allongement de la saison de croissance des plantes dans les régions froides, mais aussi résultant de l'irrigation et de l'utilisation d'engrais (en particulier en Inde et en Chine). Le changement climatique entraîne le déplacement de zones climatiques, affectant de



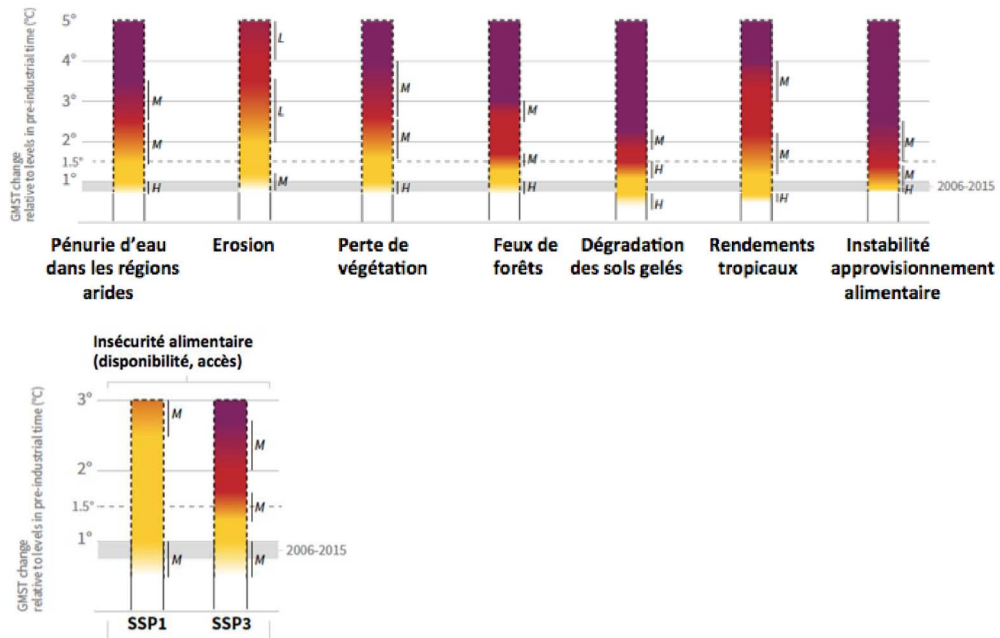
**FIGURE 15.** Comparaison du changement de température à la surface de la planète (océan et continents) et au-dessus des continents seuls, issus des observations, par rapport au niveau 1850–1900, et résumé des aspects par lesquels le changement climatique ajoute une pression supplémentaire sur les terres [IPCC, 2019a]. Note, « +ieurs » indique « plusieurs régions ».

nombreuses espèces. On observe une augmentation de la dégradation des terres dans les zones côtières et les zones de dégel du pergélisol.

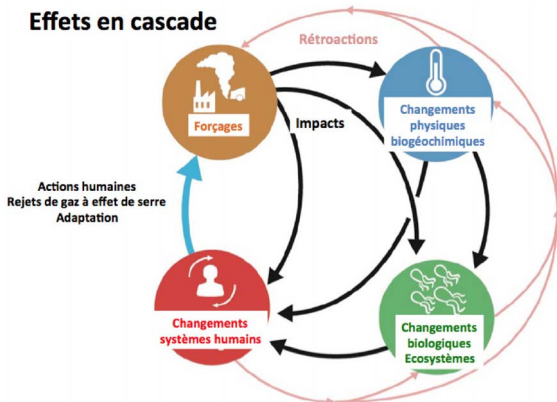
L'usage des terres, dont les activités agricoles et forestières, est responsable d'environ 23% des émissions mondiales de gaz à effet de serre, soit 13% des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> (principalement du fait de la déforestation et la destruction des tourbières); de 44% des émissions mondiales de méthane (avec des émissions liées à l'élevage de ruminants et à la riziculture, en hausse), et de 82% des émissions de N<sub>2</sub>O (avec des émissions liées aux épandages et à l'élevage, en hausse). L'ensemble du système alimentaire représente environ 1/3 des rejets de gaz à effet de serre, dont 8 à 10% pour les pertes et gaspillages alimentaires. Enfin, la réaction naturelle des terres aux changements environnementaux induits par l'homme capte et stocke dans les sols environ 29% de toutes les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> mondiales. La persistance de ce puits est incertaine dans un climat qui change.

Dans ce rapport, les risques liés aux processus terrestres du fait du changement climatique ont été évalués en fonction du niveau de réchauffement, et augmentent à mesure de l'intensité du réchauffement,

sur une plage couvrant l'ensemble des projections disponibles à horizon 2100, y compris pour des scénarios de très fortes émissions de gaz à effet de serre et de réchauffement allant jusqu'à 5 °C d'ici à 2100 (Figure 16). Les risques liés aux incendies de forêt augmentent de manière particulièrement importante entre l'actuel, 1,5 °C et 2 °C autour de la Méditerranée. Enfin, ce rapport souligne que le niveau de risque ne dépend pas que de l'intensité du réchauffement planétaire, mais aussi des choix en matière de développement socio-économique. Cela est illustré dans la Figure 16 pour l'insécurité alimentaire (en termes de disponibilité et d'accès à l'alimentation), qui montre que le niveau de risque peut être contenu même pour un réchauffement allant jusqu'à 2,5 °C à un niveau modéré dans un scénario socio-économique (SSP1) mettant l'accent sur la soutenabilité (maîtrise démographique, réduction des inégalités, production agricole bas carbone et résiliente, forte capacité d'adaptation, gestion efficace du foncier, gestion durable des terres, coopération), par rapport à un scénario socio-économique (SSP3) exacerbant les vulnérabilités (forte croissance démographique, inégalités fortes, consommation et production intensives



**FIGURE 16.** En haut, évaluation du risque d'impact (prenant en compte aléas, exposition et vulnérabilité) pour un ensemble de processus liés aux terres émergées, en fonction du niveau de réchauffement planétaire. Le code de couleur est le même que pour la Figure 13 [IPCC, 2019a].

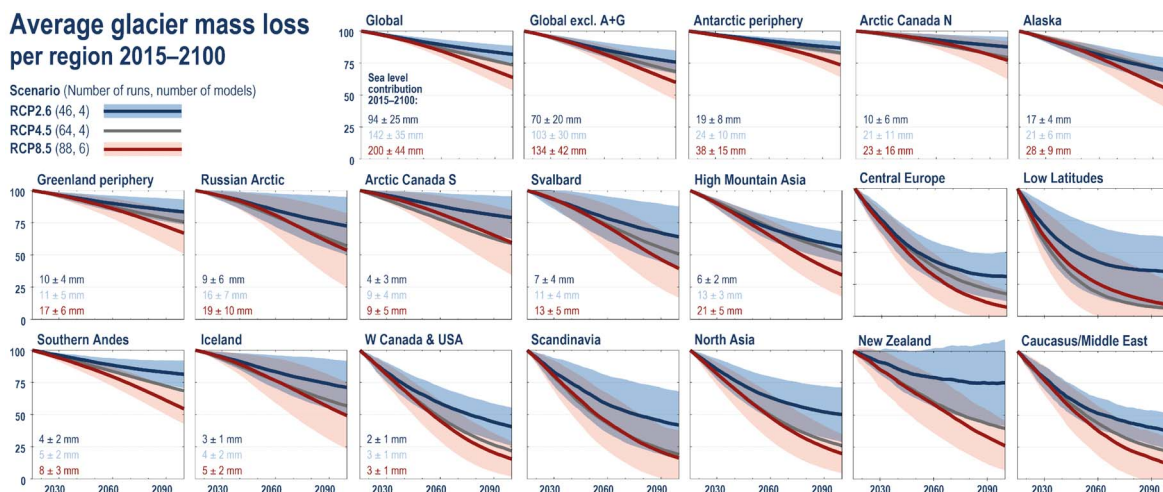


**FIGURE 17.** Illustration des relations entre forçages climatiques, changements physico-chimiques, conséquences pour les écosystèmes et les systèmes humains [IPCC, 2019b].

Cette brève présentation de ce rapport spécial met l'accent sur les aspects liés au fonctionnement du climat et aux risques d'impacts, et complète une autre présentation centrée sur les options d'action, qui ont été couvertes lors du colloque de l'Académie des Sciences en Janvier 2020 par Jean-François Soussana, l'un des auteurs principaux du rapport (<https://www.youtube.com/watch?v=YEn-KMqPOEs>). Le rapport spécial souligne également les interactions entre les changements de l'état de surface des terres, qu'il résulte de leur usage ou du changement climatique, et le climat régional : l'intensité et la durée de nombreux évènements extrêmes, en particulier les vagues de chaleur, peuvent être modifiées par les changements des conditions d'utilisation des terres. Des sols qui s'assèchent (s'humidifient) peuvent accroître (atténuer) la sévérité des vagues de chaleur. Enfin, là où le couvert forestier augmente, une évapotranspiration accrue peut entraîner des journées plus fraîches pendant la saison de croissance, et peut réduire l'amplitude des évènements extrêmes chauds.

en ressources et exerçant des pressions fortes sur les terres, changements technologiques lents...) [Popp et al., 2017].





**FIGURE 18.** Projections de changement de bilan de masse de glaciers dans différentes régions du monde, pour le scénario RCP2.6 (baisse des émissions, correspondant à un réchauffement planétaire projeté de  $1,6 \pm 0,5$  °C d'ici 2081–2100 par rapport à 1850–1900) et pour le scénario RCP8.5 (très forte hausse des émissions, réchauffement de l'ordre de  $4 \pm 0,9$  °C en 2081–2100) [IPCC, 2019b].

## 6. Points clés du rapport spécial du GIEC sur l'océan et la cryosphère dans un climat qui change

Ce rapport, préparé de manière transverse aux groupes de travail I et II du GIEC (bases physiques; impacts, adaptation et vulnérabilité), porte sur la manière dont les conséquences des activités humaines ont et vont affecter l'océan et la cryosphère (neige, glaces, glaciers, calottes, sols gelés), et leurs conséquences en cascade, physiques ou biogéochimiques, pour les écosystèmes et les sociétés humaines qui en dépendent directement et indirectement (Figure 17). Ce rapport n'aborde pas les options d'atténuation, sauf l'évaluation du potentiel de stockage de carbone dans les écosystèmes marins côtiers (« carbone bleu »). Il s'appuie sur l'évaluation de près de 7000 publications et a bénéficié de plus de 31 000 commentaires de 824 relecteurs.

L'ensemble du rapport est disponible en anglais ([www.ipcc.ch/srccl](http://www.ipcc.ch/srccl)) ainsi qu'une traduction en français de certains éléments (résumé technique, résumé pour décideurs, FAQs, glossaire; voir dans la rubrique « download report », en bas de page « UN and other languages »).

Le message principal de ce rapport est que le changement climatique induit par l'homme a déjà

une empreinte majeure, en cascade, sur les systèmes dont nous dépendons, du sommet des montagnes, dans les régions polaires, sur le littoral, et jusqu'au fond de l'océan. Ces changements se poursuivront pour les générations à venir. Cette dimension inéluctable à l'échelle de décennies à siècles met en lumière l'importance du renforcement de la résilience, de la gestion de risque, et de l'adaptation.

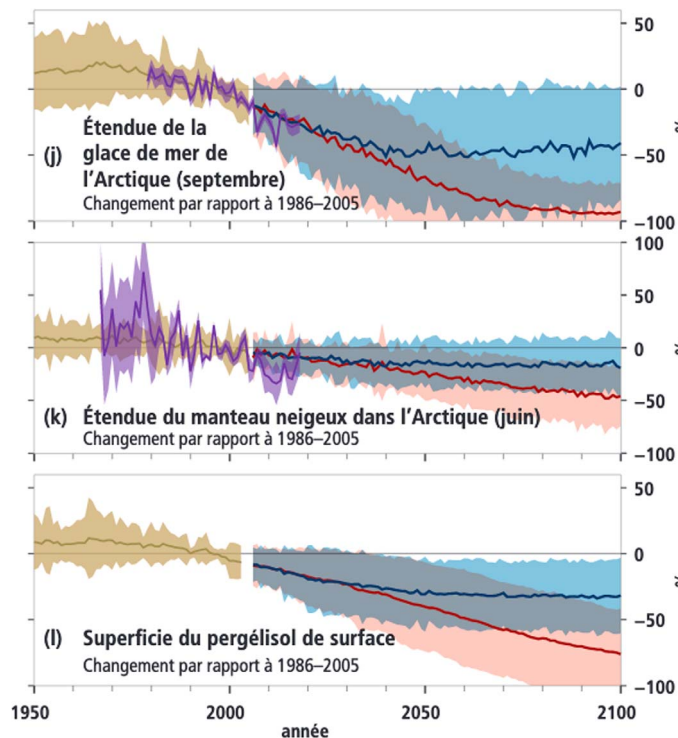
Les régions de cryosphère de haute montagne sont le lieu de vie de 670 millions de personnes actuellement; les changements de cette cryosphère affectent également les milliards de personnes vivant en aval, en particulier via le stockage de l'eau dans la cryosphère et l'approvisionnement en eau des fleuves par la fonte des glaces pendant les saisons sèches.

Dans ces régions, les glaciers, la neige, la glace et les sols gelés sont en déclin et continueront à diminuer (Figure 18). Cela modifie les saisons et les lieux affectés par les risques naturels locaux, comme les glissements de terrain, les éboulements, les avalanches et les inondations; l'altération des écosystèmes terrestres et aquatiques affecte la structure et le fonctionnement de ces écosystèmes, avec des enjeux majeurs de préservation de la biodiversité spécifique aux régions de cryosphère de haute montagne, et des enjeux de diversification (pour

## Changements passés et futurs de l’océan et la cryosphère

Indicateurs clés, changements historiques (observés et simulés) et projections selon les scénarios RCP2.6 et RCP8.5

■ Changements historiques (observés) ■ Changements historiques (simulés) ■ Projections (RCP2.6) ■ Projections (RCP8.5)



**FIGURE 19.** Simulations historiques (jaune), observations (mauve) et projections des changements d’extension de la glace de mer arctique en Septembre, de l’extension du manteau neigeux arctique en Juin, et de l’extension du pergélisol de surface, par rapport à 1986–2005 pour les scénarios RCP2.6 (bleu) et RCP8.5 (rouge) [IPCC, 2019b].

le tourisme qui dépend de la neige) et de gestion intégrée de l’eau y compris par la coopération transfrontalière pour les communautés situées en aval. En effet, dans tous les scénarios, les projections de débit annuel et estival des glaciers atteignent un pic avant ou à la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle puis diminuent. Les conséquences de ces changements touchent aussi à l’identité culturelle des communautés de haute montagne. Ce rapport souligne les bénéfices à améliorer les connaissances et le besoin de montée en compétence des acteurs locaux pour mettre en place des stratégies de gestion de risque et d’adaptation.

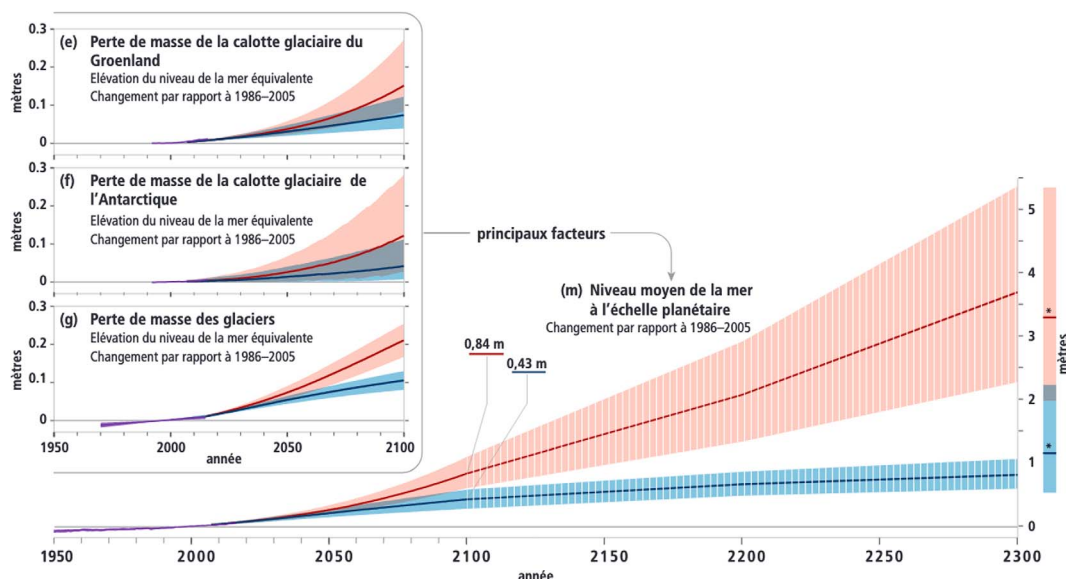
Les conséquences du réchauffement climatique sont particulièrement marquées en Arctique, où vivent 4 millions de personnes, et où le recul de l’extension de la glace de mer et du manteau neigeux

contribue à un réchauffement amplifié par rapport à la moyenne planétaire (Figure 19). Dans un scénario où les émissions mondiales diminuent fortement et où le réchauffement est contenu en dessous de 2 °C, ces changements se poursuivent jusqu’en 2050 puis se stabilisent; dans un scénario d’augmentation forte des émissions de gaz à effet de serre et de réchauffement de l’ordre de 4 °C, ces changements s’amplifient jusqu’à la fin du XXI<sup>ème</sup> siècle et au-delà. Les régions de pergélisol de surface contiennent actuellement une masse de carbone environ deux fois plus grande que celle de l’atmosphère globale. Dans le premier scénario, cette surface de pergélisol diminue d’environ 1/4 en 2100; elle diminue de 3/4 dans le scénario de très fort réchauffement, avec des conséquences importantes vis-à-vis des perturbations d’écosystèmes et des infrastructures régionales,

## Changements passés et futurs de l'océan et la cryosphère

Indicateurs clés, changements historiques (observés et simulés) et projections selon les scénarios RCP2.6 et RCP8.5

■ Changements historiques (observés) ■ Changements historiques (simulés) ■ Projections (RCP2.6) ■ Projections (RCP8.5)



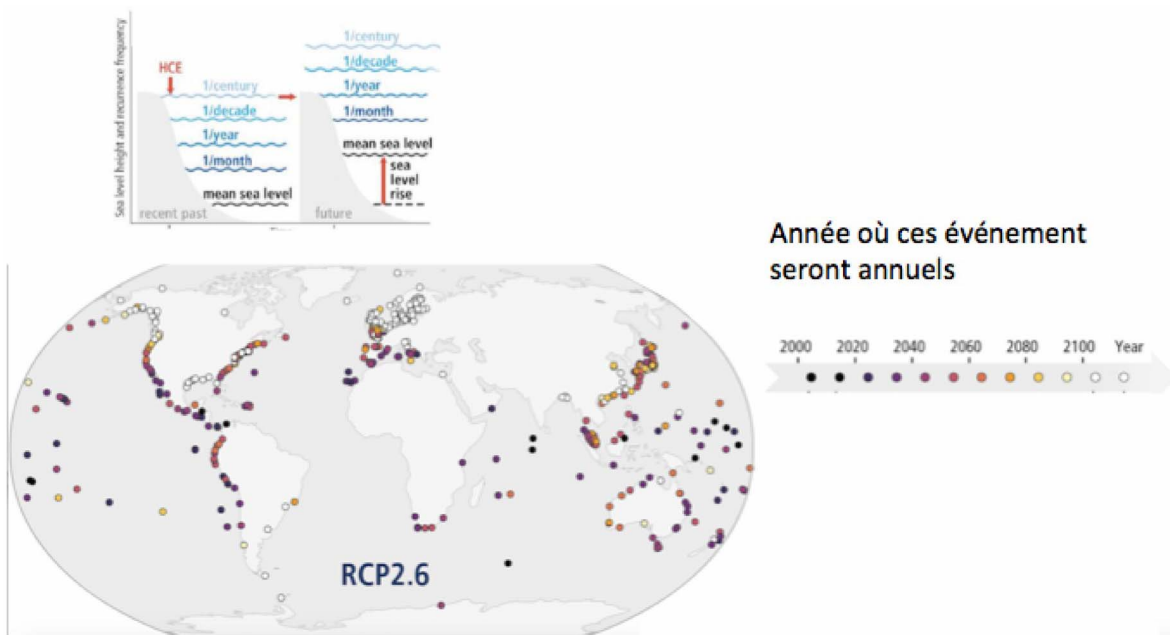
**FIGURE 20.** Simulations historiques (jaune), observations (mauve) et projections des changements du niveau des mers correspondant à l'évolution du contenu thermique de l'océan, du volume du Groenland, de l'Antarctique et des glaciers, et projections du niveau moyen de la mer, par rapport à 1986–2005 pour les scénarios RCP2.6 (bleu) et RCP8.5 (rouge) [IPCC, 2019b].

et dont les conséquences en matière de flux de gaz à effet de serre restent difficiles à évaluer. Les régions polaires vont être profondément différentes à l'avenir, et l'ampleur de ces changements dépendra fortement du niveau de réchauffement à venir. Les enjeux d'adaptation locaux et globaux sont majeurs et dépendent des capacités, des financements, et du soutien institutionnel.

Les changements qui se produisent dans les régions polaires ont des conséquences planétaires, en particulier via la perte de masse des calottes glaciaires du Groenland et de l'Antarctique. Cette perte de masse a augmenté au cours des dernières décennies, respectivement d'un facteur 2 (par fonte de surface) et 3 (par glissement plus rapide), contribuant, en plus du réchauffement de l'océan et de la fonte des glaciers, à une accélération observée du rythme moyen de montée du niveau des mers. La fonte de la cryosphère est devenue le premier facteur de montée du niveau des mers, et y contribuera à l'échelle de décennies ou de siècles (Figure 20).

Cette hausse du niveau des mers est un enjeu majeur pour les 65 millions de personnes des petits états insulaires en développement et les 680 millions de personnes vivant sur le littoral actuellement (qui devraient atteindre 1 milliard de personnes à horizon 2050). Le principal facteur d'incertitude sur l'évolution future du niveau moyen de la mer tient à la réponse des calottes de glace, y compris à la possibilité d'instabilités dynamiques (glissements de masses de glace) dans certains secteurs de l'Antarctique, qui peuvent augmenter la contribution de cette région de manière substantiellement plus élevée que la plage probable projetée à l'échelle de 2100 et au-delà. Les projections évaluées dans ce rapport font état d'une montée du niveau des mers supplémentaire de l'ordre de 45 cm à horizon 2100 et de 1 m à horizon 2300 dans un scénario de forte baisse des émissions de gaz à effet de serre, et de l'ordre de 85 cm (avec une plage probable allant jusqu'à 1m10) en 2100 et plusieurs mètres en 2300 dans le scénario le plus intensif en émissions de gaz à effet de serre





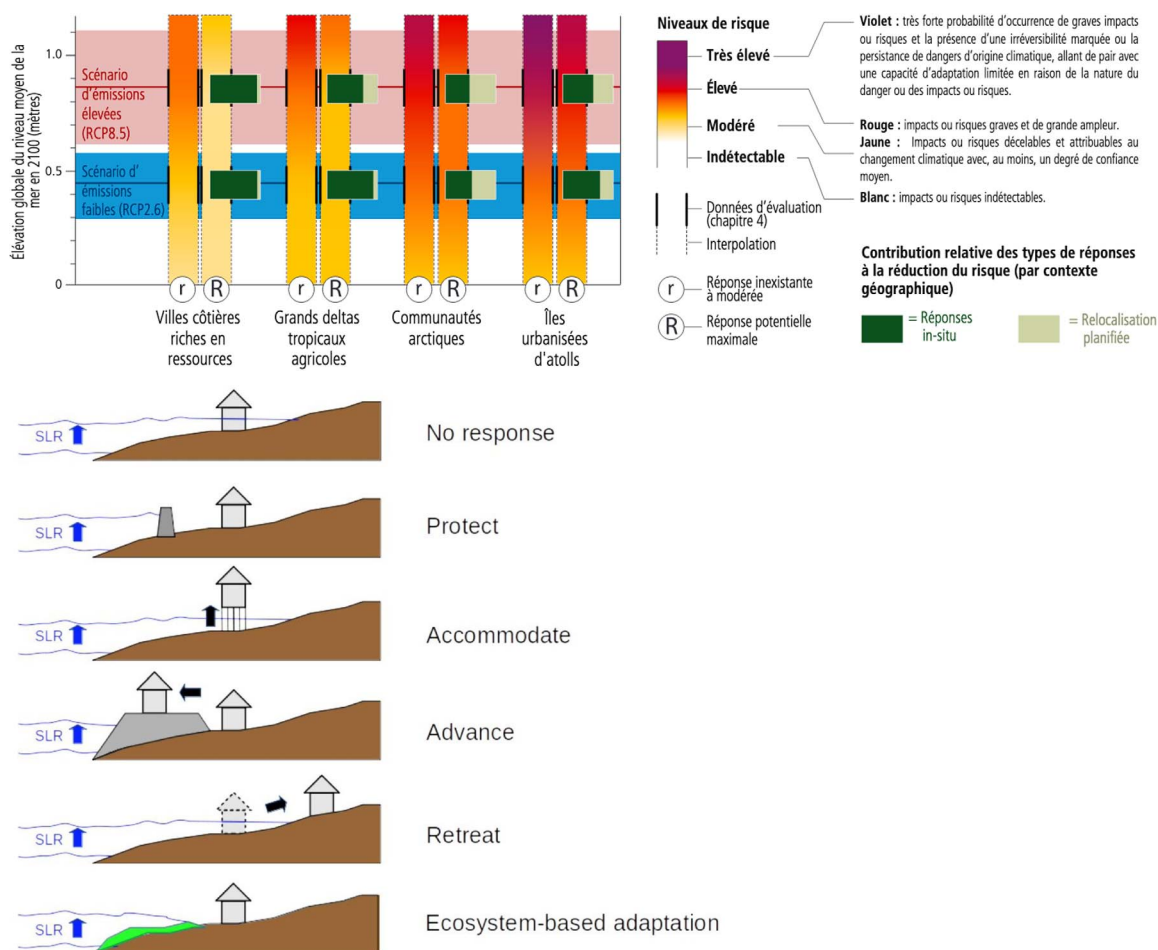
**FIGURE 21.** En haut, représentation schématique des hauts niveaux marins atteints à l'échelle mensuelle, annuelle, décennale et centennale (HCE), pour le passé récent, et pour le futur, du fait de la montée du niveau moyen des mers. En bas, analyse de l'année où ces événements centennaux deviendront annuels, dans le scénario RCP2.6, à partir des projections régionales de montée du niveau des mers et de la variabilité locale connue sur les sites des marégraphes [IPCC, 2019b].

(Figure 21). Les risques liés à la montée du niveau moyen des mers ne sont pas seulement ceux de cette montée graduelle, mais aussi portent sur la récurrence d'événements de très haut niveau marin. Les événements qui se produisaient une fois par siècle dans le passé se produiraient annuellement d'ici 2050 dans de nombreuses régions du monde, simplement du fait de la montée du niveau moyen de la mer régionalement (Figure 22). Cela ne prend pas en compte les changements d'autres facteurs, comme l'intensité des cyclones tropicaux. D'ici à 2050, de nombreuses villes côtières, deltas agricoles et petites îles, seront exposés chaque année à des risques d'inondation et de perte de terres, et ces risques seront croissants, sans investissements majeurs dans l'adaptation.

La question de la gestion du littoral et des mesures de réponse locales ou par la planification d'un repli stratégique est essentielle pour maîtriser les risques liés à la montée du niveau des mers. Les options d'action dépendent du contexte, et peuvent

s'appuyer sur des ouvrages de protection pour les villes denses, ou des solutions d'adaptation basées sur les écosystèmes côtiers pour les zones de delta agricole. Réduire les émissions de gaz à effet de serre et mettre en place des actions d'adaptation ou des mesures de repli stratégique permet de réduire et de retarder les risques. Comme pour bien d'autres aspects des conséquences du changement climatique, les communautés et les personnes les plus exposées et les plus vulnérables sont souvent celles dont la capacité de réponse est la plus faible, ce qui souligne aussi l'importance de la coopération pour limiter les pertes et dommages liés au changement climatique.

Un océan qui se réchauffe est un océan avec des vagues de chaleur marines plus intenses et plus fréquentes, qui continue à subir une acidification en captant 20 à 30% des émissions anthropiques de CO<sub>2</sub>, qui se mélange moins avec l'eau de l'océan du fait d'une baisse de la teneur en oxygène sous la surface (Figure 23). Ces changements de l'océan ont (Figure 24)



**FIGURE 22.** En haut, évaluation du niveau de risque lié à la montée du niveau des mers pour différents contextes géographiques (études de cas), et de la réduction de risque tenant compte des options de réponse par l'adaptation et par la relocalisation planifiée, à horizon 2100, et selon l'amplitude de la montée moyenne du niveau des mers (axe vertical). En bas, exemples d'options de réponse [IPCC, 2019b].

et continueront à avoir des répercussions majeures sur la vie marine, sa répartition et sa productivité (productivité primaire, biomasse des animaux marins, potentiel de prise de pêche et sécurité nutritionnelle). Les risques pour l'ensemble des écosystèmes marins et côtiers dépendent fortement du niveau de réchauffement, et donc des choix faits (ou non) pour réduire rapidement et fortement les rejets de gaz à effet de serre (Figure 25).

Les changements dans l'océan entraînent déjà des changements dans la répartition des populations de poissons, et a réduit le potentiel de prise maximale de pêche; cette baisse se poursuivra dans les régions

tropicales (Figure 26), ce qui affectera les communautés qui dépendent des produits de la mer pour leur sécurité alimentaire et nutritionnelle. Les options politiques, telles que la gestion des pêcheries et des aires marines protégées, et la réduction des autres pressions, comme la pollution, offrent la possibilité de minimiser les risques pour les moyens de subsistance en permettant à l'océan d'être plus résilient.

Ce rapport sur l'océan et la cryosphère conclut que plus nous agissons tôt, plus nous serons en mesure de faire face aux changements inévitables, de gérer les risques, d'améliorer les conditions de vie

### Changements passés et futurs de l’océan et la cryosphère

Indicateurs clés, changements historiques (observés et simulés) et projections selon les scénarios RCP2.6 et RCP8.5

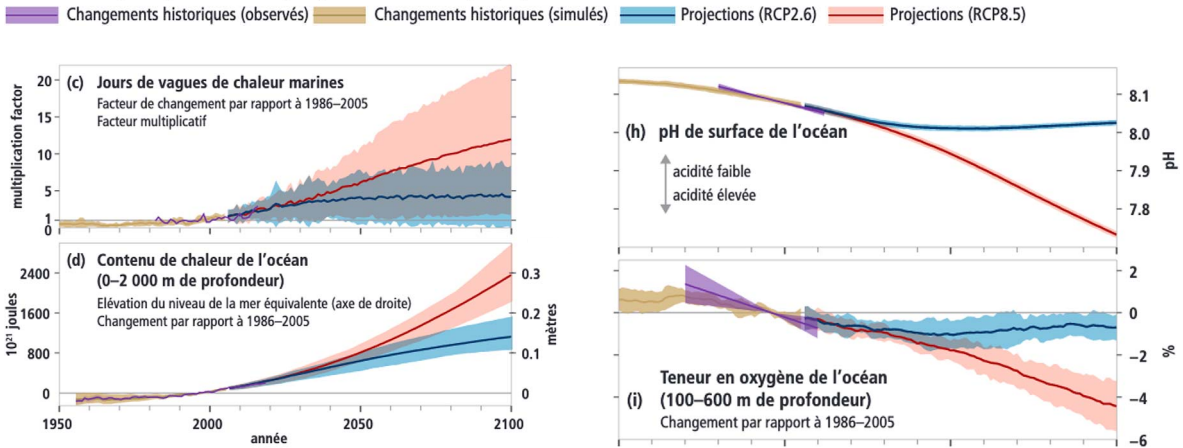


FIGURE 23. Observations, simulations historiques et projections pour deux scénarios contrastés de changements de l’océan [IPCC, 2019b].

### Impacts régionaux observés résultant de changements de l’océan et la cryosphère

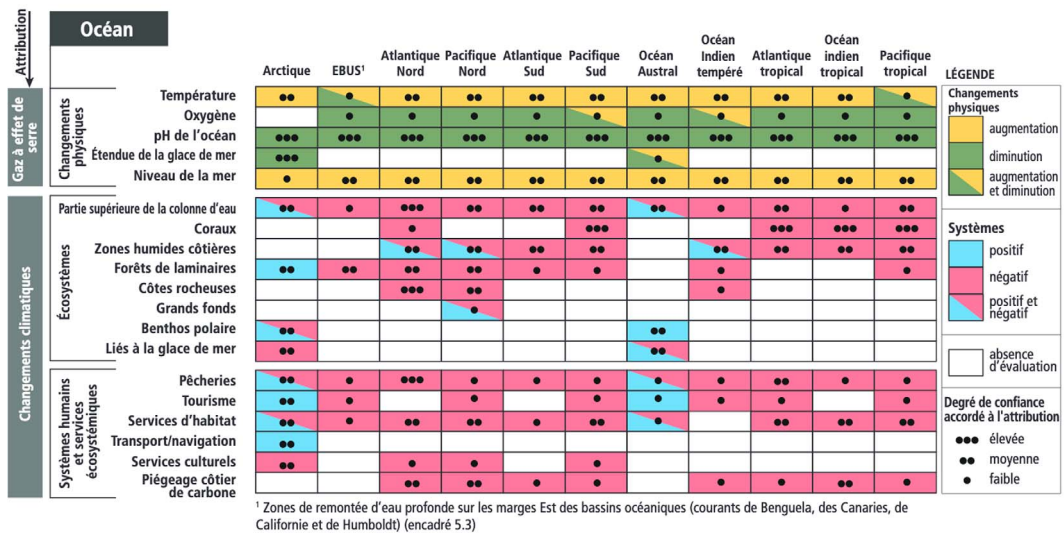


FIGURE 24. Évaluation des changements physico-chimiques de l’océan attribués aux rejets de gaz à effet de serre, et évaluation des impacts dans les écosystèmes, les services écosystémiques et les systèmes humains attribués au changement climatique, pour différentes régions océaniques. Le niveau de confiance est représenté par les points. Les couleurs de chaque case indiquent le signe des changements, augmentation ou diminution pour les variables physico-chimiques, et impacts positifs ou/négatifs (au sein d’une même région, une hétérogénéité d’impacts existe). Les zones blanches indiquent les aspects pour lesquels il n’a pas été possible de faire une évaluation de l’état des connaissances [IPCC, 2019b].

et d’assurer la soutenabilité des écosystèmes et des populations. Il souligne l’urgence de donner la prio-

rité à une action immédiate, ambitieuse, coordonnée et tenace.

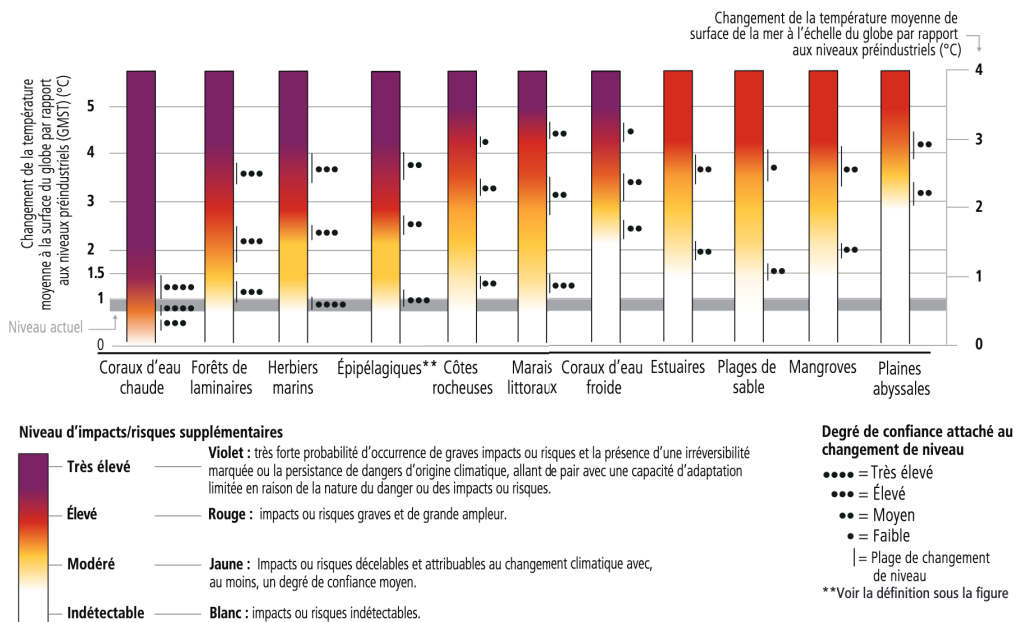


Figure RID.3 | Projections des changements, impacts et risques dans les régions et les écosystèmes océaniques :

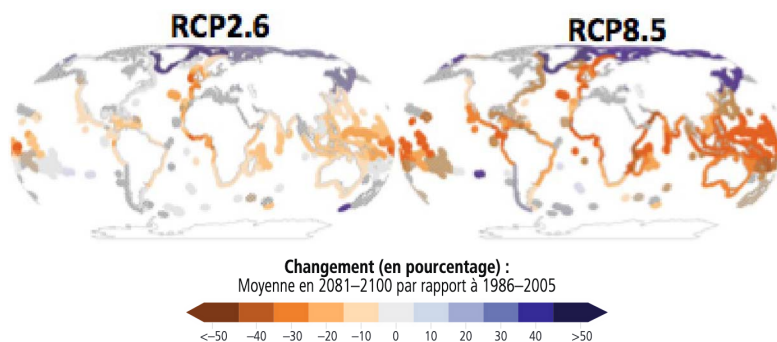
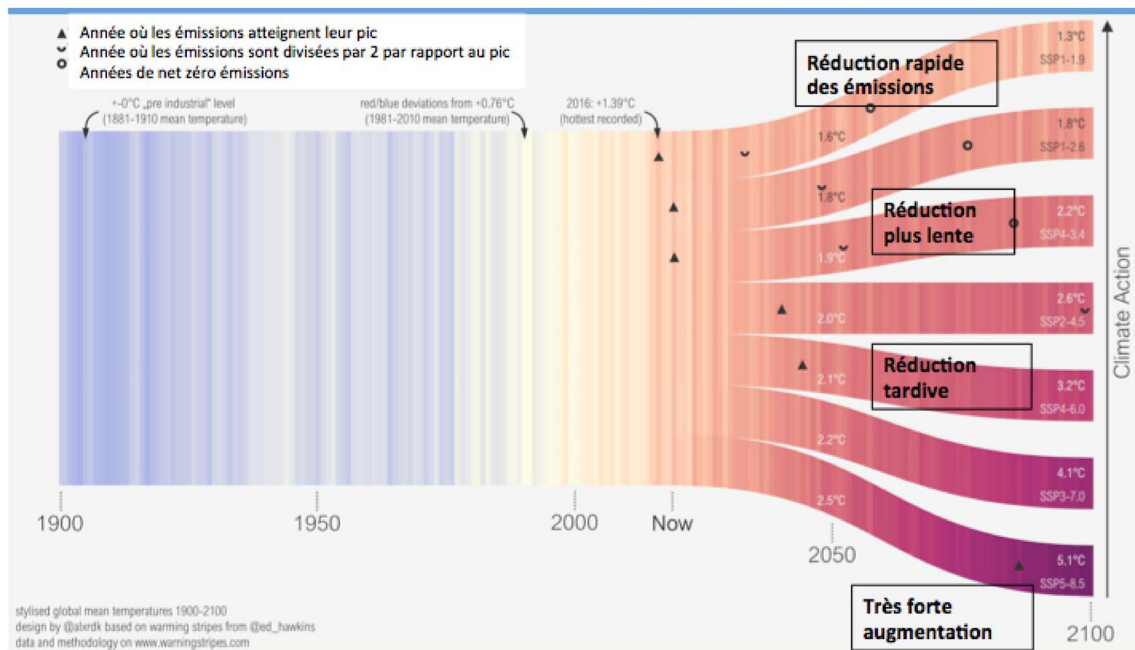


FIGURE 25. En haut, évaluation du risque d'impact (prenant en compte aléas, exposition et vulnérabilité) pour un ensemble d'écosystèmes marins en fonction du niveau de réchauffement planétaire. En bas, projections de changement du potentiel maximum de prise de pêche en pourcentage pour les scénarios RCP2.6 (à gauche) et RCP8.5 (à droite) en 2080–2100 par rapport à 1986–2005. Notez qu'une incertitude importante est associée aux projections pour la région arctique [IPCC, 2019b].

### 7. Remarques finales

S'il y a un message à retenir de cet état des connaissances, sur la base des trois rapports spéciaux du GIEC de 2018 et 2019, c'est qu'à court terme il y a cet impératif d'agir en matière d'adaptation pour renforcer la résilience, par la gestion de risque et l'adaptation, et que nos choix en matière d'émissions de gaz à effet de serre auront des conséquences majeures sur l'ampleur du réchauffement et des risques

associés au-delà de 2050. Si l'on agit pour réduire massivement les rejets mondiaux de gaz à effet de serre, il est possible de contenir l'ampleur du réchauffement à horizon 2050, mais d'autres conséquences, comme la montée du niveau des mers, se poursuivront inéluctablement pendant des siècles. Les engagements pris par les différents pays dans le cadre de l'accord de Paris sur le climat impliquent des émissions mondiales de gaz à effet de serre croissants jusqu'en 2030 ; à ce rythme d'ambition, il est



**FIGURE 26.** Représentation très schématique d'une palette de futurs possibles, en fonction des trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre (les scénarios SSP, « Shared Socio Economic Pathways », qui décrivent des évolutions socio-économiques contrastées et dont l'étiquette de droite, par exemple 1.9 ou 8.5, est une estimation du forçage radiatif en  $W/m^2$  à horizon 2100), représentant un calcul simplifié de la réponse du climat à ces différents scénarios (la plage de la variabilité naturelle du climat n'est pas représentée ici), en reprenant le code visuel de la Figure 1 (une année, une barre, du bleu au rouge pour la différence par rapport à la période ici 1881–1910). Le réchauffement observé est représenté jusqu'en 2016, puis les projections. Les scénarios diffèrent dans l'année où les émissions mondiales de  $CO_2$  atteignent leur pic (triangle noir) et sont divisées par deux par rapport au niveau de ce pic (demi-cercle noir) et atteignent le net zéro (cercle noir). Le niveau de réchauffement estimé à horizon 2050 et à horizon 2100 est indiqué. Des analyses plus approfondies sont en cours pour évaluer la plage d'incertitude associée à ces projections, tenant compte de la variabilité naturelle du climat ainsi que de la plage d'incertitude de la réponse du climat aux perturbations radiatives (« sensibilité climatique »). Source, warningstripes.com.

projeté un réchauffement atteignant de l'ordre de 2 °C en 2050 et 3 °C ou davantage à horizon 2100 (Figure 26).

Ces rapports spéciaux montrent l'importance d'intégrer l'ensemble des connaissances fournies par les différentes disciplines et l'importance de situer les options d'actions vis-à-vis du climat dans le cadre plus large des différentes dimensions de soutenabilité (via les objectifs du développement durable, par exemple) pour mieux identifier les actions qui maximisent les bénéfices, et prendre en compte les risques d'effets indésirables. Ils soulignent le besoin de combiner les connaissances issues du monde

académique aux diverses connaissances des acteurs de terrain. Enfin, ils mettent en évidence l'importance de l'éducation et de la formation continue pour construire un socle de compétences vis-à-vis du changement climatique (la notion de « climate literacy », en anglais).

Au moment de la rédaction de cet article, la pandémie de COVID-19 et les confinements mis en œuvre pour en limiter la propagation ont conduit à des baisses temporaires importantes d'émissions de  $CO_2$ , du fait d'un ralentissement de l'activité industrielle et du transport terrestre, mais aussi maritime et aérien [Le Quéré et al., 2020, Liu et al., 2020],



puis ont ré-augmenté (<https://carbonmonitor.org/>); l'expérience des crises économiques et financières précédentes montre qu'un effet rebond aura lieu. Les choix qui seront faits en matière de relance de l'activité économique dans les mois à venir vont façonner les trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre pour les années, voire les décennies à venir [Hepburn et al., 2020].

## Références

- BP (2020). *Statistical Review of World Energy*. BP, London, UK, 69th edition. 68 p. Available online here : <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>.
- Cheng, L., Abraham, J., Zhu, J., Trenberth, K. E., Fasullo, J., Boyer, T., Locarnini, R., Zhang, B., Yu, F., Wan, L., Chen, X., Song, X., Liu, Y., and Mann, M. E. (2020). Record-setting ocean warmth continued in 2019. *Adv. Atmos. Sci.*, 37 :137–142.
- de la Vega, E., Chalk, T. B., Wilson, P. A., Bysani, R. P., and Foster, G. L. (2020). Atmospheric CO<sub>2</sub> during the Mid-Piacenzian Warm Period and the M2 glaciation. *Sci. Rep.*, 10.
- Edwards, P. N. (2013). *A Vast Machine, Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*. MIT Press, London, UK.
- Haustein, K., Allen, M. R., Forster, P. M., Otto, F. E. L., Mitchell, D. M., Matthews, H. D., and Frame, D. J. (2017). A real-time global warming index. *Sci. Rep.*, 7.
- Hepburn, C., O'Callaghan, B., Stern, N., Stiglitz, J., et al. (2020). Will COVID-19 fiscal recovery packages accelerate or retard progress on climate change? *Oxford Rev. Econ. Policy*, 36(Suppl 1) :S359–S381.
- IPCC (2013). Climate change : The physical science basis, contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change.
- IPCC (2018). Global warming of 1.5 °C : An ipcc special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. in press.
- IPCC (2019a). Climate change and land : an ipcc special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. in press.
- IPCC (2019b). Ipcc special report on the ocean and cryosphere in a changing climate. in press.
- Jouzel, J., Petit, M., and Masson-Delmotte, V. (2018). Trente ans d'histoire du Giec. *La Météorologie*, 100 :117–124.
- Köhler, P., Nehrbass-Ahles, C., Schmitt, J., Stocker, T. F., and Fischer, H. (2017). A 156 kyr smoothed history of the atmospheric greenhouse gases CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O and their radiative forcing. *Earth Syst. Sci. Data*, 9 :363–387.
- Le Quéré, C., Jackson, R. B., Jones, M. W., Smith, A. J. P., Abernethy, S., Andrew, R. M., De-Gol, A. J., Willis, D. R., Shan, Y., Canadell, J. G., Friedlingstein, P., Creutzig, F., and Peters, G. P. (2020). Temporary reduction in daily global CO<sub>2</sub> emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nat. Clim. Change*, 10 :647–653.
- Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., et al. (2020). Carbon Monitor, a near-real-time daily dataset of global CO<sub>2</sub> emission from fossil fuel and cement production. *Sci. Data*, 7.
- Luu, L. N., Vautard, R., Yiou, P., van Oldenborgh, G. J., and Lenderink, G. (2018). Attribution of extreme rainfall events in the south of France using EURO-CORDEX simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 45 :6242–6250.
- Masson-Delmotte, V., Schulz, M., Abe-Ouchi, A., Beer, J., Ganopolski, A., González Rouco, J. F., Jansen, E., Lambeck, K., Luterbacher, J., Naish, T., Osborn, T., Otto-Bliesner, B., Quinn, T., Ramesh, R., Rojas, M., Shao, X., and Timmermann, A. (2013). Information from Paleoclimate Archives. In Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M., editors, *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pages 383–464. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Meinshausen, M., Vogel, E., Nauels, A., Lorbacher, K., Meinshausen, N., Etheridge, D. M., Fraser, P. J., Montzka, S. A., Rayner, P. J., Trudinger, C. M., Krummel, P. B., Beyerle, U., Canadell, J. G., Daniel, J. S.,

- Enting, I. G., Law, R. M., Lunder, C. R., O'Doherty, S., Prinn, R. G., Reimann, S., Rubino, M., Velders, G. J. M., Vollmer, M. K., Wang, R. H. J., and Weiss, R. (2017). Historical greenhouse gas concentrations for climate modelling (CMIP6). *Geosci. Model Dev.*, 1 :2057–2116.
- Morice, C. P., Kennedy, J. J., Rayner, N. A., and Jones, P. D. (2012). Quantifying uncertainties in global and regional temperature change using an ensemble of observational estimates : The HadCRUT4 data set. *J. Geophys. Res. : Atmospheres*, 117(D8).
- Myhre, G., Shindell, D., Bréon, F.-M., Collins, W., Fuglestedt, J., Huang, J., Koch, D., Lamarque, J.-F., Lee, D., Nakajima, T., Mendoza, B., Robock, A., Stephens, G., Takemura, T., and Zhang, A. H. (2013). Anthropogenic and natural radiative forcing. In Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., and Midgley, P. M., editors, *Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pages 659–740. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Popp, A., Calvin, K., Fujimori, S., Havlik, P., Humpenöder, F., Stehfest, E., Bodirsky, B. L., Dietrich, J. P., Doelmann, J. C., Gusti, M., Hasegawa, T., Kyle, P., Obersteiner, M., Tabeau, A., Takahashi, K., Valin, H., Waldhoff, S., Weindl, I., Wise, M., Kriegler, E., Lotze-Campen, H., Fricko, O., Riahi, K., and Vuuren, D. P. v. (2017). Land-use futures in the shared socio-economic pathways. *Glob. Environ. Change*, 42 :331–345.
- Sherwood, S. C., Webb, M. J., Annan, J. D., Armour, K. C., Forster, P. M., Hargreaves, J. C., et al. (2020). An assessment of Earth's climate sensitivity using multiple lines of evidence. *Rev. Geophys.*, 58.
- Stouffer, R. J. and Manabe, S. (2017). Assessing temperature pattern projections made in 1989. *Nat. Clim. Change*, 7 :163–165.
- Tollerson, J. (2020). Can the world's most influential climate report carry on? *Nature*. doi:10.1038/d41586-020-01047-8.
- Vautard, R., van Aalst, M., Boucher, O., Drouin, A., Haustein, K., Kreienkamp, F., van Oldenborgh, G. J., Otto, F. E. L., Ribes, A., Robin, Y., et al. (2020). Human contribution to the record-breaking June and July 2019 heat waves in Western Europe. *Environ. Res. Lett.*, 15(9).
- von Schuckmann, K., Palmer, M. D., Trenberth, K. E., Cazenave, A., Chambers, D., Champollion, N., Hansen, J., Josey, S. A., Loeb, N., Mathieu, P. P., Meyssignac, B., and Wild, M. (2016). An imperative to monitor Earth's energy imbalance. *Nat. Clim. Change*, 6 :138–144.
- Weart, S. (2013). Rise of interdisciplinary research on climate. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 110 :3657–3664.







---

Facing climate change, the range of possibilities / *Face au changement climatique, le champ des possibles*

# Le changement climatique, une chance pour l'humanité?

*Climate change, an opportunity for humanity?*

Mireille Delmas-Marty<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Membre de l'Institut, Professeur émérite au Collège de France, France

Current address : 9 boulevard Victor Hugo, 92200 Neuilly sur Seine, France

Courriel : [delmasmarty.mireille@gmail.com](mailto:delmasmarty.mireille@gmail.com)

**Résumé.** Le changement climatique est une chance s'il provoque un sursaut pour éviter le repli sur les Etats-nations, prendre conscience du destin commun des humains et admettre la nécessité d'une gouvernance mondiale. C'est l'occasion d'adapter nos systèmes normatifs dans le domaine juridique, politique et anthropologique. Dans le domaine juridique, les Accords de Paris ont construit un espace normatif à géographie variable et à plusieurs vitesses et les procès climatiques engagés forment déjà un laboratoire pour observer les dynamiques à l'œuvre, y compris à travers les échecs. Sur le plan politique, la reconnaissance des interdépendances appelle une nouvelle « gouvernance SVP » qui agrègerait les Savoirs avec les Vouloirs des citoyens pour encadrer les Pouvoirs. A son tour, cette reconnaissance appelle une refondation anthropologique selon laquelle les droits et libertés de l'individu émancipé seraient complétés de nouveaux devoirs de solidarité permettant de transformer la mondialisation en une mondialité apaisée.

**Abstract.** Climate change is an opportunity if it provokes a leap of faith to avoid withdrawal into nation-states, to become aware of the common destiny of humans and to recognize the need for global governance. In other words, it is an opportunity to adapt our normative systems in the legal, political and anthropological fields. In the legal field, the Paris Agreement has constructed a normative space with variable geography and different speeds, and the climate processes underway already form a laboratory for observing the dynamics at work, including through failures. At the political level, the recognition of interdependencies calls for a new "governance" that would combine scientific knowledge with the wills of the citizens to frame the powers. In its turn, this recognition calls for an anthropological refoundation according to which the rights and freedoms of the emancipated individual would be complemented by new solidarity rights that would allow the transformation of the globalization into a pacified *mondialité*.

**Mots-clés.** Anthropologie, Changement climatique, Droit, Gouvernance mondiale, Mondialité, Mondialisation, Politique climatique.

Aucun Etat ne peut désormais relever à lui seul les défis globaux : terrorisme et corruption sans frontière, crises financières et sociales, sanitaires et écologiques, désastre humanitaire des migrations, changement climatique. . . Ce dernier n'est qu'un exemple parmi d'autres, mais il a déclenché de puissantes transformations dans le champ de la gouvernance mondiale. S'il devait entraîner le sursaut nécessaire, en ces temps de repli sur l'Etat-nation, le changement climatique pourrait être une chance pour que l'humanité prenne conscience de son destin commun et s'adapte à la mondialisation. Les procès climatiques engagés<sup>1</sup> sont déjà une sorte de laboratoire pour observer les dynamiques à l'œuvre.

Même à supposer un accord scientifique sur les faits et leur interprétation, tout ou presque est à réinventer et les essais autour de la justice climatique permettent d'évaluer les difficultés et de tester les instruments de réponse. Du gouvernement des Etats à la gouvernance mondiale, le changement d'échelle aggrave en effet les difficultés. D'une part, il multiplie l'incertitude des liens de causalité entre le fait générateur et le dommage, entraînant l'incertitude des effets. D'autre part, il accroît l'imprévisibilité des comportements humains, stimulant une créativité qui empêche de déduire l'avenir de la situation précédente. Quant aux instruments de réponse, le changement climatique permet de tester leur diversité, montrant que, face au risque d'irréversibilité du dommage, la punition est tardive et la réparation imparfaite. Il faut donc tenter d'adapter nos systèmes de régulation normative dans une triple perspective : juridique, politique, anthropologique.

## Adaptation juridique

L'accord de Paris sur le climat ne crée pas de nouveaux concepts. Il ne forme même pas un ensemble cohérent. Les normes surgissent à tous les niveaux (international, mondial ou régional, mais aussi national et même infranational) et vont du droit dur avec des règles précises, obligatoires et sanctionnées au droit souple, flou (imprécis), mou (facultatif) et /ou doux (non sanctionné), en passant par toutes les catégories intermédiaires. En revanche, cet accord met

en place une dynamique combinant des objectifs communs, destinés à être régulièrement actualisés, et des responsabilités différenciées selon le contexte national lui-même évolutif.

Encore faut-il que l'évaluation des responsabilités obéisse aux mêmes critères, alors que chaque Etat communique sa contribution qui est déterminée au niveau national, sans qu'une véritable grille commune soit imposée pour garantir la comparabilité. C'est un dispositif compliqué (INDCs, pour *intended nationally determined contributions*, en français « contributions prévues déterminées au niveau national ») qui détermine les contributions des Etats. Mais il commence à dessiner un espace normatif à géographie variable et un temps normatif à plusieurs vitesses, qui résultent moins d'une hiérarchie des normes que d'interactions « entre » droit national et droit international. Le résultat ressemble à un « bricolage », au sens donné à ce terme par Claude Lévi-Strauss, puis repris par François Jacob à propos de l'évolution du vivant, et résumé par ce dernier comme une façon de « faire du neuf avec de l'ancien ». C'est bien le travail auquel se livrent les justiciables et les juges dans ces procès climatiques où l'on invoque, tantôt un droit international « contextualisé », tantôt un droit national « internationalisé », afin de responsabiliser non seulement les Etats mais aussi les entreprises transnationales (ETN) devenues des acteurs globaux.

Quant aux Etats, les juges tentent de réinterpréter la responsabilité interétatique à travers la notion de fait générateur et l'obligation de diligence et utilisent la pratique du dialogue des juges. Même les droits de l'homme sont mis à contribution. Fortement infléchis par la Cour interaméricaine des droits de l'homme à propos des populations autochtones, ils intègrent le principe de solidarité, alors qu'ils avaient été élaborés, au moins les droits civils et politiques, dans une perspective d'émancipation des individus par rapport à leur groupe(s) d'appartenance. L'émergence d'un principe de solidarité pourrait élargir la perspective des *droits* de l'homme à ses *devoirs* envers l'humanité, présente et à venir.

Quant aux ETN, les procès « emblématiques » sont tout aussi hétérogènes en ce qui concerne les victimes. Qu'y a-t-il de commun entre le paysan péruvien qui a vu sa requête contre le conglomérat allemand de l'énergie (RWE) déclarée recevable par une cour allemande, en attendant que les experts déter-

<sup>1</sup> Voir Cournil C. et Varison L., *Les procès climatiques — Entre le national et l'international*, Pedone, 2018.

minent l'éventuel lien de causalité entre les émissions polluantes de RWE et la fonte de gigantesques blocs de glace dans les Andes et également la ville de New York, engagée dans un procès contre cinq entreprises de combustibles fossiles qui ont délibérément induit le public en erreur sur les effets? Pour faire du neuf, les juges devront revisiter des notions telles que le lien de causalité (droit civil) ou les fausses déclarations (droit des affaires).

La « recette » pour réussir un procès climatique serait de réunir des plaignants particulièrement vulnérables, des défenseurs juridiquement « tangibles » et des fondements juridiques « novateurs et solides ». Ainsi conclut Emet Gebrel, à propos de l'affaire *Juliana*, procès intenté contre l'Etat fédéral américain par un groupe de jeunes de 9 à 19 ans et leur tuteur en raison des risques pour les générations futures créés par les émissions de dioxyde de carbone. L'affaire a été jugée recevable, mais on attend la décision.<sup>2</sup> Si la recette peut sembler simple, les procès climatiques montrent néanmoins l'extraordinaire complexité d'un droit mondial caractérisé par une normativité interactive (naissant de multiples interactions horizontales et verticales, descendantes et ascendantes) et évolutive avec des basculements imprévisibles, replis ou rebonds, qui appellent vigilance et inventivité. Ils révèlent l'ampleur du changement pour une pensée juridique qui, ne pouvant plus identifier le droit à l'Etat, tente de construire un état de droit, sans Etat mondial, « entre le national et l'international », peut-être même en dépassant cette distinction. Ils démontrent aussi qu'une recomposition politique est à l'œuvre au sein d'une gouvernance climatique qui associe acteurs étatiques et non étatiques selon des configurations inédites.

## Recomposition politique

Les risques climatiques ont radicalement changé la gouvernance mondiale. La fameuse « COP 21 »<sup>3</sup>

<sup>2</sup> *Les procès climatiques*, précité, p. 129.

<sup>3</sup> La vingt et unième conférence des Etats parties à la convention climat, organisée à Paris en déc. 2015, a rassemblé 195 Etats qui ont adopté l'accord de Paris à l'unanimité. Entré en vigueur moins d'un an après, cet accord avait été ratifié, à la date de mars 2018, par 174 Etats, dont la Chine.

fut d'abord une prise de conscience de ce changement. La communauté internationale reconnaissait que son destin — comme celui de tous les êtres vivants sur cette planète — dépend largement des comportements humains, car le dérèglement du système climatique est en grande partie d'origine humaine. Et les Etats reconnaissent leurs interdépendances : aucun ne peut combattre ce phénomène à lui seul.

Ce fut aussi une surprise politique car la dynamique a peu à peu échappé aux Etats, alors qu'ils étaient les seuls acteurs officiels sur la scène internationale et qu'au plan national, leurs pouvoirs étaient protégés dans les démocraties contre un gouvernement des juges par la séparation des pouvoirs en trois « branches », le législatif, l'exécutif et le judiciaire. Or le principe de séparation des pouvoirs, qui a encore été rappelé en 2007 par la Cour suprême des Etats-Unis dans la célèbre affaire *Massachusetts v Environmental Protection Agency*, est interprété désormais avec beaucoup de souplesse, qu'il s'agisse de la constitution allemande, ou du droit néerlandais dans la célèbre affaire *Urgenda* en 2015.

Quant à la réorganisation des pouvoirs et contre-pouvoirs à l'échelle mondiale, on est aussi fort loin de la vision de Montesquieu, car le pouvoir législatif et le pouvoir exécutif sont confondus au profit des Etats, alors que la montée en puissance des juges semble déjà placer le pouvoir judiciaire au niveau mondial, même quand il s'agit de juridictions nationales, dès lors qu'elles se comportent en juges mondiaux et sanctionnent la violation d'engagements internationaux. En revanche, les autres contre-pouvoirs semblent venir des acteurs non étatiques, « entités non parties » dans le langage onusien. Entre eux se dessine une nouvelle répartition des compétences qui étend le pouvoir des acteurs politiques aux acteurs économiques privés, associe au savoir scientifique des « savants », climatologues, et économistes, le savoir des « sachants », tiré de l'expérience des populations autochtones; enfin fait contribuer à l'élaboration des textes et à leur mise en œuvre le vouloir des acteurs civiques, élargi de la société civile organisée (ONG, syndicats, Universités, Mouvement religieux...) à de simples citoyens tirés au sort (cf la CCC, Convention Citoyenne pour le Climat, rapport juillet 2020).

Certes cet équilibre, fondé sur des engagements volontaires, reste instable et rien n'est définitivement

gagné, mais cette gouvernance mondiale SVP (Savoir/Vouloir/Pouvoir) est apparue à partir d'une alliance, qui aurait sans doute été impossible sans les nouvelles technologies numériques, entre les divers acteurs de la société civile. L'alerte avait été lancée au sein du GIEC (groupement international d'experts sur le climat) par les climatologues, chercheurs et experts scientifiques, depuis longtemps organisés à l'échelle globale. Leur légitimité n'était pas gagnée d'avance. Il a fallu que le GIEC surmonte les doutes émis à propos du 4<sup>ème</sup> rapport (ce « Climate Gate » a peut-être contribué à l'échec de la conférence de Copenhague en 2009) ; puis échappe à la « chasse aux sorcières » engagée par le nouveau président américain (*Le Monde*, 15 décembre 2017), ainsi qu'à l'instrumentalisation de certains travaux scientifiques (« Halte à la manipulation de la science », *Le Monde* 30 novembre 2017). En revanche, l'alliance s'est faite très vite avec la société civile organisée, sensible depuis longtemps aux questions écologiques. Cette alliance, renforcée au sein des Comités économiques et sociaux et complétée, a sans doute accéléré les procédures de signature, puis de ratification ou d'approbation qui commandaient l'entrée en vigueur de l'accord de Paris.

Il resterait à renforcer le statut de ces nouveaux acteurs, y compris de simples citoyens tirés au sort (CCC précitée), comme futurs « citoyens du monde », pour les protéger, notamment lorsqu'ils deviennent lanceurs d'alerte, et pour définir leur déontologie et leur responsabilité dans les procès climatiques. Sans négliger au niveau local une sorte de citoyenneté territoriale qui va de l'engagement de certains Etats fédérés, comme la Californie, à la coalition des grandes villes « Under 2° », donnant plein sens à l'injonction : « Agis en ton lieu. Pense avec le monde ». Le retrait des Etats-Unis ayant paradoxalement renforcé l'alliance, au point que l'ancien maire de New York Michael Bloomberg, devenu l'envoyé spécial du Secrétaire général de l'ONU a pris la tête d'une coalition d'acteurs non étatiques décidés à faire « *every thing America would have done if it had stayed committed* ».

Vu la lenteur des processus onusiens, il sera néanmoins nécessaire, pour éviter l'enlèvement de la justice climatique, que les droits nationaux prennent le relais. En France, après la loi du 17 août 2015 sur la transition énergétique et l'ordonnance du 31 décembre 2016 relative aux bilans d'émissions de GES

et aux audits énergétiques, on peut citer la loi d'avril 2017 sur le devoir de vigilance des entreprises qui renforce la justiciabilité des normes notamment climatiques. En 2018, la loi dit Pacte (Plan d'action pour la croissance et la transformation des entreprises) élargit l'intérêt de l'entreprise à la défense de biens communs, comme le climat, tandis qu'il est proposé d'inscrire la protection du climat dans la réforme constitutionnelle en cours. De son côté, la Chine vient d'ajouter dans le préambule de sa constitution, révisée en 2018, la contribution au destin commun de l'humanité.<sup>4</sup> On pourrait y voir l'amorce d'une refondation anthropologique.

### Refondation anthropologique

A l'humanité émancipée des Lumières, le changement climatique ajoute une humanité « interdépendante », en interaction avec l'écosystème Terre dont elle n'est qu'une simple composante et non la propriétaire. Aux principes venus des droits « de l'homme », la lutte contre le changement climatique ajoute un principe de solidarité écologique, invitant à penser un humanisme pluriel et évolutif. Une telle mutation appelle de nouveaux récits pour renouveler l'imaginaire des peuples. Car seule une véritable « insurrection de l'imaginaire » permettra de penser l'universel sans le réduire, comme nous l'avons fait pendant des millénaires, ni à nos propres intérêts, collectifs ou individuels, ni à nos seuls systèmes de pensée. Si l'on admet qu'à la différence des communautés nationales fondées sur la mémoire et l'histoire, la communauté mondiale sera fondée sur l'anticipation et le destin commun, il reste à savoir vers quel destin nous nous dirigeons.

Reconnaître les interdépendances pourrait conduire à une refondation anthropologique, si l'émancipation de l'individu, héritée de l'humanisme des lumières, était complétée de nouveaux droits de solidarité. Une telle évolution ne saurait voir le jour sans un nouveau récit. Ce ne serait ni le récit des droits de l'homme, ni celui du marché et de sa main invisible (y compris dans la version chinoise des Nouvelles routes de la soie), ni le récit post-humaniste de l'homme augmenté, ni

<sup>4</sup>Gosset D., « from Chinese Renaissance to community of shared destiny », *China Daily* 23-24 juin 2018.

même le récit-catastrophe de l'effondrement de la planète. Ce serait une combinaison de ces récits pour obtenir au final le récit-aventure d'une mondialité apaisée, par opposition à la mondialisation sauvage.

En conclusion, adaptation juridique, recomposition politique et refondation anthropologique devraient nous rendre modestes. Nous avons appris que la Terre n'est pas le centre du système solaire, qui lui-même n'est pas le centre du monde. Nous décou-

vrons à présent que l'humanité n'est pas le centre de l'écosystème Terre, mais une simple composante. Il est vrai qu'il s'agit de la seule composante « responsable » car douée, si l'on en croit la DUDH,<sup>5</sup> de raison et de conscience. Alors, oui, le changement climatique est bien une chance pour l'humanité s'il lui apprend à se gouverner avec suffisamment de sagesse pour que la terre demeure habitable par les vivants, humains et non humains, et reste la demeure commune des générations présentes et futures.

---

<sup>5</sup>Déclaration Universelle des Droits de l'Homme des Nations Unies de 1948.





---

Facing climate change, the range of possibilities / *Face au changement climatique, le champ des possibles*

# Changement climatique et éducation

## *Climate change and education*

Pierre Léna<sup>\*,a</sup> et David Wilgenbus<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Académie des Sciences & Fondation *La main à la pâte* & Office for Climate Education, Académie des Sciences, 23 quai de Conti 75006, Paris, France

<sup>b</sup> Office for Climate Education & Fondation *La main à la pâte*, Institut Pierre-Simon-Laplace, Case 101, Tour 45-55 2ème étage, bureau 215, 4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France

*Courriels* : pierre.lena@obspm.fr (P. Léna), david.wilgenbus@oce.global (D. Wilgenbus)

**Résumé.** Figurant comme une des obligations de l'Accord de Paris ratifié en 2016, l'éducation au changement climatique est un outil précieux pour agir à grande échelle sur les comportements et les choix des sociétés. Elle est aussi une requête de la jeunesse, confrontée plus que d'autres à un avenir qui l'inquiète, mais cette éducation peut aussi aider à mobiliser son énergie. Nombre d'efforts surgissent pour assurer cette éducation, dont le caractère systémique et pluridisciplinaire demande une évolution substantielle des programmes scolaires. Le rôle des professeurs est crucial et leur accompagnement l'est tout autant. Parmi nombre d'initiatives, il nous semble essentiel de leur offrir des outils pédagogiques basés sur le meilleur état de l'art des connaissances scientifiques sur le climat, à savoir les rapports du Groupe d'experts Intergouvernemental pour l'Étude du Climat (GIEC).

**Abstract.** Education dealing with climate change is part of the UNFCCC Paris Agreement ratified in 2016. Education is precious to act on a broad scale on people's behavior and society choices. It is also a demand from the youth who, more than others, is facing a worrying future, but can be helped for a mobilization of energies. Numerous initiatives emerge to implement it, while its systemic and interdisciplinary character requests a significant evolution of school's curricula. The role of teachers is crucial and accompanying them essential. We therefore consider critical to propose pedagogical resources, which are based upon the best current knowledge on climate, i.e. the reports from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

**Mots-clés.** Éducation, Professeurs, Développement professionnel, Accompagnement, Unesco, Écoles, Transition climatique.

L'émergence des préoccupations climatiques résulte d'un long processus [Aykut and Dahan, 2014]. Il naquit au sein de la communauté scientifique avec

le « rapport Charney », publié en 1979 par l'Académie des sciences des États-Unis [Charney et al., 1979] et qualifié par les climatologues « d'incroyablement visionnaire » [Bony et al., 2013]. La préoccupation pénétra ensuite le monde politique avec les étapes suivantes, marquées par la création du Groupe d'experts

---

\* Auteur correspondant.

Intergouvernemental pour l'Étude du Climat (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, 1988; GIEC en français), puis celle de l'UN-*Framework Convention for Climate Change* (UNFCCC, ratifiée en 1994), organisatrice chaque année des *Conference of Parties* (COP). Parallèlement à cette lente émergence, le concept de développement durable a fait son apparition en 1987 [Brundtland, 1987] et a progressivement inclus la problématique climatique.

## 1. Le contexte

Bien que la préoccupation éducative soit évoquée dès 1992 dans la Convention Cadre des Nations-Unies sur le Changement Climatique (Article 6), il faut sans doute attendre la ratification, par 195 États unanimes, de l'Accord de Paris en 2016, pour que cette préoccupation s'exprime clairement, avec le poids politique que possède cet Accord. Son Article 12 énonce : *Les parties doivent prendre des mesures pour développer l'éducation liée au changement climatique, la formation, la prise de conscience du public, sa participation et son accès à l'information.*

Cette prise de conscience, désormais notable, procède d'un double mouvement. D'une part, il apparut de plus en plus clairement que les objectifs de la transition écologique, ceux d'une société désormais qualifiée « bas carbone », impliquaient des transformations si considérables de mode de vie et de production qu'elles ne sauraient être acquises sans une adhésion large des populations de la planète, tout au moins dans les États démocratiques. Cette adhésion requiert un minimum de compréhension du changement climatique, de ses causes et de ses impacts. D'autre part et dans de nombreux pays, l'opinion publique ou certains politiques contestent les résultats des travaux scientifiques, quand ces derniers attribuent, de façon de plus en plus certaine, le réchauffement climatique à l'action de l'homme. Ces contestations mettent en évidence la nécessité de partager et faire comprendre aux opinions publiques et aux politiques la rationalité de ces analyses scientifiques ainsi que leur justesse.

Le développement durable avait été défini en 1987 dans le rapport Brundtland (*Notre avenir à tous*, faisant suite au Rapport du Club de Rome de 1972) comme *un développement qui réponde aux besoins du présent des générations futures à répondre aux leurs*. L'Agenda 2030 des Nations unies publié en

2015 élargit cette définition : *éradiquer la pauvreté, protéger la planète, garantir la prospérité pour tous*. En 2015, peu avant l'adoption de l'Accord de Paris, le détail des objectifs du développement durable (ODD) est publié, sous forme de dix-sept objectifs, les *SDG Sustainable Development Goals* [Agenda ONU, 2015]. L'éducation relève de l'objectif 4; le climat relève explicitement de l'objectif 13 mais, de fait, est largement présent dans les objectifs concernant l'eau, l'énergie, la croissance économique, les villes, l'océan, les écosystèmes terrestres. La science, par la quasi-totalité de ses disciplines, est omniprésente dans ces sujets [ISC, International Council for Science, 2017].

Cette multiplicité d'objectifs, ainsi que les interactions systémiques entre eux tous, représentent une difficulté objective pour l'éducation, tant ceci peut l'éloigner de ses habituelles structures disciplinaires d'organisation des savoirs. Il faut sans doute repenser en profondeur l'éducation au temps de l'Anthropocène [Wallenhorst and Pierron, 2019]. Toutefois, au sein de l'éducation primaire, secondaire ou supérieure, la place de la problématique du climat, fondée sur des concepts scientifiques et celle, plus large, de la transition écologique, sont plus aisées à cerner et donc traiter. La présente analyse s'attache à ce propos plus restreint.

Dès l'année 2016, la communauté scientifique se saisissait de cette problématique au sein du réseau des Académies des sciences (InterAcademy Partnership for Science), et publiait fin 2017, la Déclaration *Changement climatique et Éducation*, qui, sur la base de constats faits dans une trentaine de pays, formulait un certain nombre de recommandations [InterAcademy Partnership, 2017]. Celles-ci soulignaient, entre autres : le caractère systémique, donc nécessairement interdisciplinaire, de l'évolution requise des programmes scolaires; la nécessité impérative d'une préparation et d'un accompagnement des enseignants, partout dans le monde, mais singulièrement dans les pays émergents ou en développement; le rôle essentiel de la communauté scientifique pour contribuer à ces évolutions profondes; enfin la nécessité de déployer cet effort de façon soutenue en le débutant dès l'école primaire, tant les concepts, attitudes et compétences à acquérir par les élèves sont nombreux et difficiles.

Notant l'importance que jouent les « Résumés pour décideurs » publiés par le GIEC, sous forme



synthétique et accessible à l'occasion de chacun de ses rapports, une recommandation spécifique proposait en parallèle la publication de *Résumés et outils à l'usage des professeurs*, sous une modalité à définir, puisque les questions éducatives n'entrent pas dans le mandat confié au GIEC par les États qui en assurent la gouvernance.

Les perspectives climatiques s'étendent sur plusieurs décennies, voire le siècle et au-delà. Après l'Accord de Paris, ces perspectives sont entrées largement dans les débats publics et politiques. Il n'est donc pas surprenant que la jeunesse du monde se soit sentie concernée au premier chef. Sa mobilisation s'est exprimée un peu partout dans le monde, culminant sans doute en 2019, au moins de façon symbolique, par les prises de parole de la jeune militante suédoise Greta Thunberg à la tribune des Nations-Unies lors du Sommet Climat, puis au Forum économique de Davos en 2020. Cette mobilisation a été consacrée par une couverture médiatique exceptionnelle.

Cette expression de la jeunesse prend de multiples formes, souvent marquées par une extrême émotion, surtout chez les plus jeunes : *collapse* ou *apocalypse*, *fin de la planète*, *mort de la civilisation*, *effondrement de l'humanité*, *sixième extinction* sont quelques-uns des qualificatifs employés, qui lient parfois climat et perte de la biodiversité. Le terme « solastalgie » est apparu pour caractériser cette angoisse climatique, ou éco-anxiété. Une autre traduction, plus positive, de cette sensibilité apparaît également chez nombre de jeunes, désireux de pouvoir traduire, dans leurs orientations professionnelles et le choix d'un employeur, l'importance qu'ils accordent à la transition écologique et aux questions environnementales.

Dans un Livre blanc publié à la suite d'une rencontre de jeunes, organisée en 2015 par le GIEC et l'université d'Edmonton (Canada), ceux-ci s'expriment sur l'éducation. Leurs conclusions, qui cernent bien la problématique éducative, méritent d'être citées ici :

*... nos écoles nous préparent à devenir les leaders de demain en nous enseignant les connaissances de base. Néanmoins elles ne nous apprennent pas comment nous adapter et avoir un impact sur le changement climatique... Celui-ci doit être enseigné de façon transversale, avec des activités de projets, qui aideront les élèves à acquérir les compétences nécessaires : plus de pensée en profondeur et donc plus de solutions en*

*profondeur.*

*Nous devons reconnaître les complexités d'implantation de changements de programmes, ainsi que les barrières économiques et sociales que connaissent bien des écoles. Des collaborations créatives entre élèves, communautés, autorités locales permettront de lever les obstacles auxquels nous faisons face* [Godwaldt and Karsgaard, 2018].

Une série d'enquêtes, conduites en Europe, aux États-Unis et en Australie auprès de jeunes âgés de 12 à 25 ans, a conclu que *parmi ceux-ci, on trouve un niveau plutôt bas concernant les concepts scientifiques qui fondent le changement climatique, ainsi qu'une tendance à sous-estimer le niveau du consensus scientifique sur ce changement*. Toutefois, fait remarquable, ces enquêtes concluent également que les messagers, auxquels ces jeunes font le plus confiance pour leur apporter une information, sont d'une part les réseaux sociaux qui les connectent les uns aux autres, d'autre part leurs professeurs [Lee et al., 2015].

## 2. Une lente émergence

La nécessité d'une prise de conscience mieux informée était déjà notée dans l'Article 6 de la Convention créant l'UN-FCCC (Framework Convention on Climate Change), qui stipule « *la promotion de l'éducation, de la formation et de la perception publique (awareness) du changement climatique* » [UN-FCCC, 1992]. Le dispositif *United Nations Institute for Training and Research* (UNITAR), créé en 1963, accueille depuis 2009 le secrétariat de l'organisation multilatérale UN CC :Learn, financée par la Suisse et rassemblant une trentaine de partenaires internationaux (tels UNESCO, Organisation météorologique mondiale, Banque mondiale...). L'objectif de UN CC :Learn est de produire au niveau global des outils pertinents, et de contribuer localement à l'implantation d'une éducation au changement climatique. Il est difficile de mesurer l'impact réel de cette entreprise [UN CC :Learn, 2009]. En 2012, lors de la COP18 tenue à Doha, un programme de huit ans est adopté en référence à l'Article 6, mentionné plus haut, de la convention UN-FCCC. Ce Programme de Doha comprend une *Action for Climate Empowerment*. Des points focaux « Jeunesse » doivent être identifiés dans

tous les pays, en parallèle aux correspondants nationaux du GIEC. La prise de conscience et les transformations attendues sont vastes : évolution des systèmes éducatifs, rôle des médias, participation du public, mais leurs effets sur l'éducation scolaire ne paraissent pas encore établis.

En 2016, publiant un remarquable rapport annuel sur l'éducation, l'UNESCO le focalise sur *la création d'un avenir durable pour tous*. Le constat détaillé qui y est formulé manifeste l'impréparation, dans la plupart des systèmes éducatifs du monde, à mettre en œuvre une éducation au développement durable, et plus précisément l'inclusion des dix-sept objectifs identifiés par les Nations-Unies [Unesco, 2016]. Par exemple, une enquête faite dans 70 pays y est citée, montrant que les termes *environnement* et *climat* sont très largement absents des programmes scolaires, comme de la formation des enseignants.

Néanmoins, le défi que suscite cette impréparation des systèmes scolaires et universitaires est progressivement relevé dans nombre de pays, avec l'appui de la communauté scientifique et des Académies des sciences, à la suite de la Déclaration de l'IAP adoptée en 2017 *Changement climatique et Éducation*. Aux États-Unis, le réseau *Climate Literacy and Energy Awareness Network* (CLEAN), destiné à accompagner les professeurs des écoles primaires et secondaires, reçoit le soutien des grandes agences scientifiques, telles NSF, NASA, NOAA, et ce malgré le retrait de l'Accord de Paris décidé par Washington [Clean, 2019]. En Californie, le remarquable programme *Bending the Curve* est destiné à tous les étudiants *undergraduate* des douze campus de l'Université de Californie ; il est désormais élargi aux universités d'État locales [Ramanathan et al., 2019]. En Nouvelle Zélande, tous les élèves de 11 à 15 ans ont désormais un nouveau programme introductif à la compréhension du changement climatique. De multiples initiatives se développent pour créer des réseaux internationaux d'écoles, telles les ECO-schools de la *Foundation for Environmental Education* soutenue par l'UNESCO, les 12 000 écoles spécifiquement associées à l'UNESCO au sein du réseau ASPnet, ou encore le réseau *Climate Change Education Stakeholders Community*, reconnu par l'UN-FCCC sans toutefois en dépendre. Les thématiques sont souvent beaucoup plus larges que celle du climat proprement dit. Parfois, elles recouvrent davantage la mise en action des jeunes autour d'objectifs écologiques limi-

tés et locaux, plutôt qu'une compréhension en profondeur qui serait mise en œuvre par les enseignants, autour des problématiques d'atténuation et d'adaptation.

S'agissant de l'Europe, la réponse fort inégale des systèmes éducatifs et des actions péri-scolaires apparaît dans une première enquête publiée en 2020 par le réseau académique ALLEA. Parmi les recommandations figurant dans ce rapport, on peut citer la nécessité de mieux intégrer dans les projets éducatifs les questions éthiques et le thème de l'adaptation au changement climatique, ou encore de déployer plus d'efforts dans la formation des enseignants [Allea Report, 2020].

En France, une éducation au développement durable a été prônée par les instances ministérielles depuis le début des années 2000. Néanmoins, la difficulté d'intégrer dans les programmes et de façon construite, ces objectifs si généraux, souvent peu ou mal définis, n'a guère conduit à ce que les élèves en possèdent une vision systémique et fassent le lien avec les connaissances disciplinaires qui forment le cœur de leurs apprentissages. Par ailleurs, le changement climatique, thème souvent perçu comme difficile, est peu souvent choisi par les enseignants dans leurs projets d'éducation au développement durable, comme le montrent les multiples enquêtes réalisées chaque année par les rectorats. Dans l'académie de Créteil (Ile-de-France) par exemple, le changement climatique n'a été explicitement enseigné que dans 7% des établissements en 2018 et 2019, alors que les deux-tiers des écoles et collèges y ont travaillé sur les déchets ou la biodiversité [Rectorat Créteil, 2019].

A ces difficultés s'ajoute un élément de contexte nouveau, qui fait craindre une fracture générationnelle. L'enjeu est ainsi posé en 2019 par le Conseil supérieur du programme qui écrit : *Le ministère de l'Éducation nationale et de la Jeunesse se fait ainsi l'écho d'une forte demande de la jeunesse qui, de manière récurrente, manifeste son intérêt pour les questions écologiques et ne cesse d'interpeller les générations qui l'ont précédée sur leur responsabilité dans la dégradation de l'environnement, et sur la nécessité de développer et diffuser les savoirs rigoureux indispensables à la compréhension des mécanismes de ces changements et au rétablissement des écosystèmes naturels. Il s'agit de prévenir une fracture qui pourrait naître, en dépassant les reproches que les jeunes feraient à leurs aînés, afin de reconstruire le lien de*

*confiance nécessaire à la construction d'un avenir commun* [Conseil supérieur des programmes, 2019].

La révision profonde de l'organisation du baccalauréat à partir de l'automne 2019 a conduit à la création d'un tronc commun, dit « Enseignement scientifique », soit deux heures hebdomadaires suivies pendant les deux dernières années de scolarité par tous les élèves du lycée général [Eduscol, 2020]. Cette tentative, encore modestement interdisciplinaire puisqu'elle n'inclut ni l'économie ni la philosophie autour des questions d'éthique et de justice climatique, concerne environ 340 000 jeunes (en flux annuel), quelle que soit leur spécialisation, aux questions climatiques, qui représentent près du quart de cet enseignement. Un prolongement de l'effort est envisagé vers les classes de primaire et de collège – K-9 dans la notation internationale [Conseil supérieur des programmes, 2019]. Au niveau universitaire, des initiatives isolées se sont fait jour dans certains établissements, mais la grande masse des étudiants n'est pas introduite aux problématiques de la transition écologique, sauf dans un petit nombre de spécialités directement orientées vers l'environnement [Shift Project, 2019]. Une politique nouvelle pourrait se dessiner en 2021 sur ce point, par des recommandations faites aux établissements d'enseignement supérieur par leurs ministères de tutelle.

### 3. De nouveaux objectifs pour l'éducation au climat

Dans son rapport annuel de 2016 cité plus haut, l'Unesco fait bien apparaître la difficulté de l'insertion des problématiques de la transition écologique (climat, biodiversité notamment) dans l'éducation formelle, principalement primaire et secondaire. Cette insertion représente un défi pour les systèmes éducatifs, confrontés à la prise en compte d'objectifs nouveaux, qu'il s'agisse des curricula, de la formation et de l'accompagnement des enseignants, ou de l'acceptabilité de traiter un sujet qui leur paraît, à tort, controversé. Ce défi s'étend à une nécessaire ouverture des établissements scolaires aux familles et à l'ensemble de la communauté locale, puisqu'il s'agit non seulement d'éduquer, mais aussi d'amorcer la transition écologique, ne serait-ce que dans les gestes du quotidien.

S'agissant de l'éducation au changement climatique, il importe de préciser ici ces défis, en

interrogeant successivement comment les professeurs et leurs élèves peuvent le *comprendre, faire confiance* aux sciences qui en prévoient les conséquences, *agir* pour les atténuer ou s'y adapter, et enfin *saisir les solidarités* mises en jeu. Examinons brièvement ces quatre points.

#### 3.1. Comprendre

Le changement climatique demande une compréhension systémique de nature scientifique, faisant droit à une incontournable complexité. D'autres moments de l'Histoire ont confronté au sens commun la complexité des phénomènes naturels : la révolution copernicienne, la vision pastorienne, l'indéterminisme du monde microscopique. Ici encore, il s'agit donc en premier lieu de mettre en place enseignement ancré dans les « sciences dures », qui disent la réalité.

Considéré dans sa globalité, le système Terre, avec ses composantes physiques et sa biosphère, est gouverné par une multitude d'interactions entre sous-systèmes. Il se caractérise également par une diversité d'échelles spatiales, allant du plus local — la température ou la pluviosité par exemple — au plus global — la Terre dans sa relation avec le Soleil —; d'échelles temporelles, s'étendant de la journée au million d'années; de paramètres multiples, couplés entre océans, continents, atmosphère; de régimes d'évolution parfois prédictibles, parfois chaotiques, parfois intermédiaires et susceptibles d'instabilités aux conséquences majeures. La participation de la biosphère humaine au système Terre introduit des éléments de sciences sociales, géographie humaine, économie, démographie qui complexifient encore la compréhension. Limiter au climat le propos pédagogique n'interdit d'ailleurs pas de noter que la nécessité de compréhension systémique se manifeste à propos d'autres thématiques majeures, comme l'épuisement de la biodiversité, l'explosion démographique, la gestion des risques. Dans cet écheveau de notions, il faut « *aider chaque élève à se construire des repères solides, pour pouvoir donner sens à l'actualité et se positionner de manière rationnelle* » [Masson-Delmotte, 2019].

#### 3.2. Faire confiance

La recherche du « comprendre » met également en jeu la confiance qu'il est possible et même nécessaire

d'accorder à ce que propose la science. Pour accepter les faits et les probabilités d'occurrence des projections, il faut établir avec la science un rapport de confiance, en saisissant comment elle fonctionne et comment sont validées ses conclusions, au sein de ce qu'il est convenu d'appeler la communauté scientifique. Ce rapport de confiance est aujourd'hui fortement mis à mal, en particulier dans les sociétés développées, où fleurissent *fake news* et théories du complot. Une enquête conduite en 2019 par la Fondation Jean Jaurès et *Conspiracy Watch* montre que 21% de la population française croit au minimum à cinq théories du complot, la proportion étant la plus élevée chez les plus jeunes. Le thème du changement climatique, à la fois complexe et incroyablement foisonnant — plus de 20 000 articles scientifiques publiés chaque année — présente une difficulté importante aux élèves, mais aussi aux professeurs : que sait-on? comment le sait-on? à qui faire confiance, et pourquoi? [Fondation Jean-Jaurès, 2019].

Cet objectif d'éducation à la nature de la science explore l'esprit scientifique, l'esprit critique et la confiance, le rôle de la preuve, le fonctionnement collectif de la communauté scientifique. Il est un enjeu pour la pratique de la science en classe, comme le promeut l'action de *La main à la pâte* et les outils qu'elle propose [Farina et al., 2018, Fondation La main à la pâte, 2020, Zimmermann et al., 2017].

### 3.3. *Agir*

Il n'est point d'éducation qui n'inclurait pas un espoir dessinant l'avenir. Si l'éducation, au collège, au lycée ou à l'université, se limitait à transmettre le message alarmant que les projections climatiques et leurs impacts humains — migrations climatiques par millions par exemple — qu'adressent les rapports successifs du GIEC, elle manquerait totalement son but. Des enfants ou adolescents dont l'avenir serait aussi sombrement présenté ne pourraient trouver aucun motif de le vivre et sombreraient dans la solastalgie. Il faut donc assigner à cette éducation un double but : l'esprit critique et le cœur plein d'espoir (*a critical mind and an hopeful heart*) [Ramanathan et al., 2017]. Toute l'intelligence et l'énergie de la jeunesse du monde ne seront pas de trop pour imaginer, concevoir et réaliser, avec tout l'outillage de la science et des technologies, les nouvelles configurations que requiert une société décarbonée et durable.

L'humanité a su se mobiliser et passionner sa jeunesse en d'autres temps pour la construction de l'Europe ou la conquête de la Lune : ces exemples sont là qui font espérer [Jouzel and Larrouturou, 2017].

Encore faut-il qu'un tel propos éducatif trouve un terrain, qui relie le minuscule champ d'action de l'individu à l'immensité du problème global. Les mouvements d'éco-écoles, de lycées verts, la mise en place en France d'éco-délégués dans toutes les classes (2019) peuvent fournir autant d'occasions d'une école différente où l'action se marie à la compréhension, la requiert et l'illustre. Par exemple, les stratégies de *compensation volontaire de carbone* offrent ici un terrain d'exercice à toutes échelles, puisqu'on peut aussi bien tenter de compenser l'empreinte carbone de ses déplacements personnels en voiture que celui de son lycée.

### 3.4. *Être solidaire*

L'éducation ne se limite jamais à des connaissances, elle veut aussi proposer des valeurs. À rebours de la transmission autoritaire d'une idéologie, l'école propose et la liberté de l'enfant s'y éduque, afin que l'homme ou la femme que va devenir cet enfant ait appris à exercer cette liberté. Au-delà des connaissances, l'éducation au changement climatique fait appel à des valeurs d'humanité et de solidarité qui n'ont sans doute jamais été requises avec une telle ampleur. À la traditionnelle solidarité générationnelle qui jadis n'allait guère au-delà de la seconde génération, s'en substitue une nouvelle. Solidarités avec des espaces ou des temps, lointains l'un comme l'autre, ne vont pas de soi. La justice climatique est la recherche d'une traduction concrète et efficiente de ces nouvelles solidarités.

Le jugement de valeur s'éduque, il s'applique aussi à l'illusion d'une toute-puissance de la technologie pour répondre aux enjeux climatiques [Blamont, 2018, Pape François, 2015].

## 4. Le rôle clef des enseignants

Une enquête a été réalisée en 2019 aux États-Unis auprès de professeurs de l'enseignement secondaire qui sont interrogés sur leur posture vis-à-vis d'un enseignement du climat, ainsi qu'auprès des parents [NPR-IPSOS, 2019]. Alors que la grande majorité de ces derniers souhaitent cet enseignement pour leurs

enfants (80%), les enseignants énumèrent les obstacles rencontrés : thématique sans lien avec les sujets prescrits par les programmes; élèves trop jeunes pour l'aborder; concepts non maîtrisés par le professeur; manque d'outils pédagogiques. Les professeurs « climato-sceptiques » sont très minoritaires (8%). Ce constat, fait aux États-Unis, ne serait guère différent en Europe. Il serait encore renforcé dans les pays en développement, comme nous avons pu nous-même le constater ces dernières années lors de nombreuses sessions de formation, en Asie ou en Afrique, chez les enseignants de l'école primaire et secondaire. La place des problématiques climatiques dans les médias ne laisse ni indifférents ni ignorants ces professeurs, qui sont volontiers bienveillants vis-à-vis de ces problématiques, d'autant plus qu'ils mesurent l'appétence de leurs élèves et la confiance que ceux-ci leur font, comme souligné plus haut. En regard, ils perçoivent leur ignorance devant la complexité scientifique du sujet et leur manque d'outils pédagogiques pour le traiter. Les cloisonnements disciplinaires caractéristiques des programmes et de leur formation ne facilitent pas la nécessaire vision systémique. Ceci est plus vrai encore lorsqu'il s'agit d'associer les analyses faites respectivement par les sciences dites « dures » et par les sciences humaines et sociales, s'agissant par exemple d'atténuation ou d'adaptation. Quatre autres facteurs importants sont également présents chez les enseignants : le premier concerne leur capacité de distinguer une opinion d'un fait, établi par la science avec certitude ou avec une probabilité donnée; le deuxième est leur capacité de comprendre la méthodologie ou d'accepter les résultats des projections climatiques à une ou plusieurs décennies, un siècle ou davantage, tant ceci peut heurter le « bon sens » ou sens commun. Le troisième concerne leur posture, en tant que professeurs se sentant tenus à l'objectivité des connaissances, face à des choix qui impliquent éthique et politique. L'introduction de notions scientifiques sur la définition ou le fonctionnement du climat global ne suffirait pas à répondre à ces trois préoccupations. Enfin, le quatrième est lié à la nature « lointaine » du problème à étudier. Beaucoup d'enseignants, dans les pays développés et plus encore dans les pays en développement, font plus volontiers travailler leurs élèves sur des problématiques locales et immédiates : la déforestation, la prolifération des déchets, la qualité de l'air et de l'eau. Ces thèmes, outre qu'ils sont

perçus comme conceptuellement plus accessibles, sont également plus « gratifiants » car les actions qui peuvent être mises en place ont des effets immédiats et visibles. Résoudre cette dernière difficulté nécessite d'ancrer le changement global, et notamment ses impacts, dans le local et le présent. Ceci requiert une bonne connaissance du sujet car des considérations générales ne suffisent pas, et renvoie donc aux difficultés précédentes.

Il est peu probable qu'une transformation, possédant l'ampleur ainsi définie, puisse s'accomplir sans que soient prises de vigoureuses mesures d'accompagnement du corps enseignant. Il faut aller vite — une décennie au plus —, car les échéances climatiques n'attendent pas. Il faut agir partout, car toute la jeunesse du monde est concernée par ce problème global, comme elle a déjà su le montrer. Dès 2017, les principes d'un tel accompagnement, destiné aux enseignants, ont été proposés dans la Déclaration IAP des Académies des sciences, citée plus haut. Ces principes comprennent :

1. Une introduction, élémentaire, pluridisciplinaire et claire aux connaissances scientifiques factuelles, à la compréhension de leur solidité et des méthodes qui y ont abouti, aux interactions multiples existant au sein du système Terre, entre atmosphère, océan, biosphère et action des êtres humains. Cette introduction s'appuie sur les « sciences dures », mais n'ignore pas les sciences humaines et sociales.
2. Une stratégie pédagogique qui vise à conjuguer pour les élèves, en fonction de leur âge et maturité cognitive, trois éléments distincts, complémentaires et de nature différente : la connaissance des faits et risques, dits par la science; les perspectives positives d'actions d'atténuation ou d'adaptation, du très local au plus global; les valeurs humaines mises en jeu, telles que solidarité ou justice climatique.
3. L'accès à des outils pédagogiques adaptés (ressources pour la classe), mettant en jeu une attitude active et coopérative des élèves, depuis le début du primaire jusqu'à la fin du secondaire.
4. Une indispensable formation initiale et un développement professionnel continu des enseignants.

Lors de chacun des rapports successifs du GIEC (*Assessment Reports* tous les cinq à six ans, *Special Reports* intermédiaires), les éléments scientifiques sont repris, résumés et simplifiés dans des Résumés pour décideurs (*Summaries for Policy Makers*) qui éclairent et servent de base aux décisions politiques, économiques et financières des États et de la société civile. Les enseignants, tant du primaire que du secondaire, et les responsables éducatifs ont besoin de traductions semblables, qui soient mises à leur portée et répondent à leurs besoins — ce qui n'est pas le cas des Résumés pour décideurs issus du GIEC. Les quatre propositions ci-dessus se complètent donc d'une cinquième, à savoir :

5. Les rapports du GIEC devraient désormais donner lieu à la réalisation de « Résumés pour les professeurs », qui en traduisent, simplifient et adaptent la substance scientifique. Des « Outils pour professeurs », de caractère plus spécifiquement pédagogique, peuvent alors en découler avec les adaptations indispensables, au niveau cognitif des élèves d'une part, aux contextes locaux tant climatiques qu'éducatifs d'autre part.

Le mandat du GIEC ne comprend pas, de façon explicite, cette dimension spécifiquement éducative et il apparut rapidement que cet organisme, tout en la soutenant, ne pourrait la prendre en charge. D'autre part, les initiatives plus générales de l'UN CC :Learn et la création de points focaux « Jeunesse » par l'UN-FCCC, mentionnés ci-dessus, apportent déjà un élément de réponse.

Or, depuis les années 1990, un grand chantier s'est ouvert dans le monde au bénéfice de l'éducation à la science des jeunes scolaires, âgés de 6 à 16 ans (dès 3 ans dans certains pays, comme la France). Ce chantier a voulu répondre à de graves lacunes qui marquaient cette éducation à la science dans presque tous les pays, à savoir sa faible présence et une pédagogie « verticale », négligeant ou ignorant la pratique de l'observation et de l'expérience. Proposant une pédagogie d'investigation (*inquiry*) adaptée aux sciences de la nature, ce chantier fut engagé par des scientifiques de grand renom. Développé dans près d'une centaine de pays sous forme de projets pilotes, parfois pénétrant de façon structurelle les programmes scolaires et la formation des enseignants, il connaît en France une

extension importante, sous le nom de *La main à la pâte* [Charpak et al., 2005, Fondation La main à la pâte, 2020]. Sa ligne directrice est un appui apporté aux enseignants — primaire, collège, éventuellement lycée — pour les aider à enseigner une science attirante, impliquant une participation active des élèves autour de l'observation, de l'expérimentation, de l'émission d'hypothèses, de l'argumentation et du raisonnement. La réussite de cette entreprise repose sur une communauté scientifique étroitement associée à l'accompagnement et au développement professionnel des enseignants, à la production de ressources pertinentes pour la classe, au sein de création de réseaux nationaux, régionaux et internationaux. Le développement considérable de ces actions dans le monde a contribué à développer, chez plus de dix millions de jeunes scolaires, l'émerveillement, la curiosité, l'imagination, la rationalité et la compréhension du processus sur lequel se construit la science.

Bien des leçons concernant l'accompagnement des professeurs ou la production de ressources pédagogiques, tirées de ce quart-de-siècle autour de l'enseignement des sciences de la nature, sont transposables à l'éducation au changement climatique, même si celle-ci doit s'élargir aux sciences humaines et sociales, et inclure une dimension éthique. Les notions scientifiques sont plus complexes, le jeune enfant n'en saisira que de très grandes lignes, et il sera en outre préparé à une vertu morale d'attention, de respect, de confiance, et d'engagement personnel.

## 5. L'Office for Climate Education

En 2017, ce modèle réussi d'une pédagogie renouvelée des sciences de la nature a fourni un fondement solide en vue d'un projet spécifique et original, international, centré sur l'éducation au changement climatique et les objectifs de l'Art. 12 de l'Accord de Paris. Ce projet a été conçu suite à la COP21 en 2015, lors d'une réflexion conduite entre l'Académie des sciences et l'Agence française de développement (Colloque 2016), puis construit par un dialogue en profondeur avec des climatologues et des réseaux éducatifs (Colloque Vatican 2016). Après une étude de faisabilité au sein de la Fondation *La main à la pâte* en France, en se situant en conformité avec les recommandations des Académies, le projet aboutit

à la création, en mars 2018, d'un Office for Climate Education (OCE).

L'Office for Climate Education se donne pour but d'accompagner les rapports du GIEC par la mise à disposition du corps enseignant, partout dans le monde, de *Résumés et Outils pour les Professeurs*, cohérents avec la pédagogie d'investigation évoquée plus haut, préparés en lien étroit avec un réseau d'acteurs dans le monde que l'OCE anime et avec la communauté scientifique, en particulier les *Technical Support Units* des trois groupes de travail du GIEC et les Académies des sciences [Office for Climate Education, 2019]. La cible principale du projet s'adresse, par le biais des professeurs, à la jeunesse dans une tranche d'âge allant principalement de 9 à 16 ans, sans ignorer toutefois le lycée. Ce choix laisse à d'autres instances la préoccupation, également essentielle, de faire évoluer l'enseignement universitaire. Nombre d'actions de communication au sens large,<sup>1</sup> nombre de ressources éducatives sur le thème du climat existent déjà de par le monde, et sont accessibles sur Internet, le plus souvent en anglais. L'originalité du projet est de s'adresser spécifiquement aux systèmes éducatifs et aux enseignants, de leur proposer une pédagogie précise ayant fait ses preuves et de leur fournir une diversité de moyens multilingues pour la mettre en œuvre, le tout appuyé sur un engagement constant de scientifiques. À ce jour, une telle synergie n'existe généralement pas.

En 2019, lors de sa première année d'existence, l'OCE a ainsi organisé dix événements nationaux ou régionaux (Asie, Amérique latine, Afrique, France), impliquant plus de 400 enseignants et formateurs et cumulant plus d'un millier d'heures de formation. Conformément à la ligne énoncée plus haut, des *Résumés pour professeurs multilingues* ont été produits et diffusés à l'occasion des Rapports du GIEC *Réchauffement global de 1.5 °C* (2018) et *Océan et Cryosphère* (2019), un autre Résumé est en

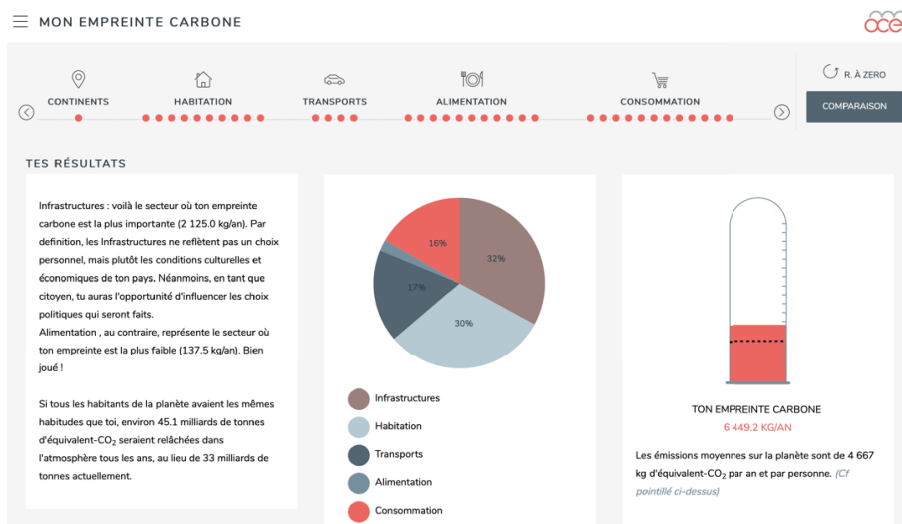
préparation sur *Les terres émergées*. Des ressources pour la classe très diversifiées, également conformes aux principes pédagogiques d'investigation et de projets, sont en production et largement diffusées. Leur conception et mise en œuvre associent une vision climatique globale et d'indispensables déclinaisons locales, assurées au sein d'un important réseau international de partenaires. Début 2020 et sur proposition du gouvernement français, le projet de l'OCE a été reconnu par l'Unesco, qui lui a attribué le statut de « Centre de catégorie 2 sous l'égide de l'UNESCO », facilitant ainsi les dialogues locaux avec les instances éducatives.

Illustrons par quelques exemples ces différents outils mis à la disposition de la communauté éducative.

(a) *Le Rapport spécial du GIEC. Réchauffement global de 1.5 °C — Résumé à destination des enseignants* est une explicitation, rendue accessible aux enseignants, du contenu scientifique de ce rapport. Il est introduit par cette citation : *Chaque degré compte, chaque année compte, et chaque décision compte : ne pas agir aujourd'hui accroît le fardeau des générations à venir [...]. Limiter le réchauffement global à 1.5 °C n'est pas impossible, mais demande des politiques vigoureuses et immédiates* (V. Masson-Delmotte, ce colloque, 2020). Le document comprend, en une vingtaine de pages, les conclusions essentielles du GIEC, avec vocabulaire et figures simples, exercices et liens d'approfondissement. Publié en ligne et en quatre langues (français, anglais, allemand, espagnol), il est utilisé lors des sessions de formation d'enseignants ou de formateurs, et peut servir de base commune à des développements pédagogiques mis en œuvre dans des contextes locaux différents, selon la région du monde [Lescarmontier, 2018]. Un Résumé pour enseignants, similaire, a été produit en 2020 pour accompagner le rapport spécial du GIEC « Océan et Cryosphère » [Lescarmontier, 2020].

(b) En appui au Rapport du GIEC « Océan et Cryosphère » (2019), un guide pédagogique élaboré est préparé, testé dans de nombreuses classes et publié sous le titre *Le climat entre nos mains. Océan et cryosphère* [Rocha and Wilgenbus, 2019]. Les activités proposées permettent de développer les connaissances et compétences scientifiques des élèves ainsi que leur esprit critique, mais aussi de les sensibiliser aux enjeux environnementaux et sociaux et d'encourager leur créativité. Ce guide est donc fortement

<sup>1</sup>En voici quelques exemples. À Hambourg (Allemagne) le *International Climate Change Information Program* (ICCIP : <https://www.haw-hamburg.de/en/ftz-nk/programmes/iccip/>); au Royaume-Uni le *Climate Outreach and Information Network* (<https://climateoutreach.org>); en France et en direction des universités, le *Shift Project*, thinktank de la transition carbone (<https://theshiftproject.org/>); aux États-Unis, *Teach the Earth*, produisant des ressources pour les professeurs (<https://serc.carleton.edu/NAGTWorkshops/climatechange/index.html>).



**FIGURE 1.** L'empreinte carbone est l'une des animations interactives du Guide « Le climat entre nos mains » [Rocha and Wilgenbus, 2019]. Cette séquence, proposée par le professeur, veut susciter une posture active des jeunes, portant sur leur empreinte carbone, avec de multiples paramètres ajustables.

multidisciplinaire, s'appuyant à la fois sur les disciplines scientifiques traditionnelles, sur les sciences humaines et sociales, ainsi que sur les arts et l'éducation physique. Il met en œuvre des pédagogies actives telles que la démarche d'investigation (*inquiry*) ou la pédagogie de projet. Il comprend une variété de propositions, déclinables par les enseignants selon le niveau de leurs élèves et le contexte local.

Ce guide pédagogique est le premier d'une série qui couvrira les rapports du GIEC à venir. Il est structuré en quatre parties : un *éclairage scientifique* accessible et détaillé, rendant en particulier l'enseignant capable d'accepter sans crainte les questions de ses élèves ; un *éclairage pédagogique*, contribuant à une démarche active des élèves ; une série de séances thématiques sous le titre « *Nous comprenons* », qui comprennent expérimentation, jeux de rôle, incitation au débat et au travail de groupe, analyse documentaire ; enfin la série « *Nous agissons* », au cours de laquelle la classe choisit, conçoit et met en œuvre un projet d'action, visant un objectif d'atténuation, d'adaptation ou de sensibilisation au changement climatique : les élèves y deviennent acteurs du changement dans leur environnement et leur communauté. De très brèves vidéos de climatologues et des animations multimédia complètent les outils ainsi offerts aux enseignants (Figure 1).

Ces ressources pédagogiques, disponibles à tous, viennent également en appui à des actions intensives de développement professionnel d'enseignants, durant une semaine, organisées spécifiquement avec des collaborations éducatives locales, dans nombre de pays, tout particulièrement en développement. Un réseau international de partenaires, notamment en Amérique latine et en Asie du Sud-Est, permet de structurer progressivement et au plus près du terrain une communauté de pratiques, qui diffuse localement les contenus scientifiques et pédagogiques proposés.

Il est intéressant ici de mentionner une autre démarche, complémentaire de celle de l'OCE, et également issue de la communauté scientifique. TROPICSU est né en 2018 de l'initiative de Lingadahalli S. Shashidhara, biologiste et professeur de l'Université de Pune (Inde). Cette initiative a reçu le soutien de l'International Council of Scientific Unions (ICSU, intégré en 2019 dans l'International Council for Science). Le but, original, est de proposer des séquences pédagogiques, portant sur le changement climatique et utilisables en fin de cycle secondaire ou début de cycle universitaire, quelle que soit la spécialisation du cours enseigné. L'offre, diversifiée, s'offre ainsi à des cours dominés par la physique, la chimie, l'environnement, la géographie, les sciences



sociales, etc. Une analyse fine de la qualité scientifique et pédagogique des ressources, extrêmement diverses, présentes sur le réseau Internet est faite par le groupe de Pune. À partir de celles-ci, des plans de leçons sont construits, adaptés à la spécialisation et au niveau des étudiants, ainsi qu'à la région du monde. Des ateliers pour éducateurs sont organisés en Inde et dans d'autres régions, en Afrique et Amérique latine notamment [Tropicsu, 2020].

## 6. Conclusion

Une éducation scientifique pour tous les jeunes, depuis l'école primaire, apparaît comme indispensable pour rendre les sociétés de demain capables d'aborder la transition écologique et de s'approprier les éléments de base nécessaires à la comprendre et à y agir. La thématique climatique est bien adaptée, tant elle inclut des éléments incontournables des « sciences dures » tout en requérant d'autres compétences, relevant des sciences humaines et sociales, et d'autres enfin liés à des choix de valeurs. Cette nécessité étant posée, sa traduction en termes pédagogiques au bénéfice de centaines de millions d'enfants de par le monde est une entreprise aussi redoutable qu'urgente, qui ne pourra se mettre en place qu'avec de très nombreuses contributions et initiatives. Celles-ci devront viser les programmes scolaires, mais autant et peut-être davantage encore les enseignants qui, dans l'état actuel des systèmes éducatifs, sont loin d'être préparés à un tel objectif fortement interdisciplinaire.

Aux côtés des acteurs institutionnels et des ONG, la communauté scientifique se mobilise déjà pour les accompagner, et devra le faire dans les années à venir à une échelle nationale, régionale et globale beaucoup plus large. Elle est certaine de trouver chez les professeurs une attente réelle mais parfois inquiète, et de répondre alors à une demande profonde de la jeunesse, dont un engagement créatif sera nécessaire pour parvenir à des sociétés décarbonées.

## Références

- Accord de Paris (2015). United nations framework convention on climate change. [http://unfccc.int/files/essential\\_background/convention/application/pdf/english\\_paris\\_agreement.pdf](http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf).
- Agenda ONU (2015). <https://www.un.org/sustainabledevelopment/development-agenda/>.
- Allea Report (2020). *A snapshot of Climate Change Education Initiatives in Europe*. <https://allea.org/publications/>.
- Aykut, S. C. and Dahan, A. (2014). *Gouverner le climat? 20 ans de négociations internationales*. Fondation des sciences politiques, Paris.
- Blamont, J. (2018). *Réseaux. Le pari de l'intelligence collective*. Cnrs Éditions édition.
- Bony, S., Stevens, B., Helt, I. H., et al. (2013). Carbon Dioxide and Climate : Perspectives on a Scientific Assessment. In Asrar, G. and Hurrell, J., editors, *Climate Science for Serving Society. Research, Modeling and Prediction Priorities*, pages 91–414. Springer, Berlin.
- Brundtland, G. H. and World Commission on Education and Development (1987). *Our Common Future : Report of the World Commission on Education and Development*. Oxford University.
- Charney, J. G., Arakawa, A., Bolin, B., et al. (1979). *Carbon Dioxide and Climate : A Scientific Assessment. Report of the Ad Hoc Study Group on Carbon Dioxide and Climate*. National Academy of Sciences, Washington (D.C).
- Charpak, G., Léna, P., and Quéré, Y. (2005). *L'Enfant et la science*. O. Jacob, Paris.
- Clean (2019). [https://cleanet.org/clean/educational\\_resources/index.html](https://cleanet.org/clean/educational_resources/index.html).
- Conseil supérieur des programmes (2019). <https://www.education.gouv.fr/renforcement-des-enseignements-relatifs-au-changement-climatique-la-biodiversite-et-au-developpement-5489>.
- Eduscol (2020). <https://eduscol.education.fr/cid143130/enseignement-scientifique-bac-2021.html>.
- Farina, M., Pasquinelli, E., and Zimmermann, G. (2018). Esprit scientifique, esprit critique. In *Un projet pédagogique pour la classe*. Le Pommier, Paris.
- Fondation Jean-Jaurès (2019). <https://jean-jaures.org/nos-productions/enquete-complotisme-2019-les-grands-enseignements>.
- Fondation La main à la pâte (2020). <http://www.fondation-lamap.org>.
- Godwaldt, T. and Karsgaard, C. (2018). International Youth White Paper on Climate Change. Education and Cities. IPCC and University of Edmonton (Al-

- berta, Canada).
- InterAcademy Partnership (2017). A statement on climate change and educations. (Léna, P. and Chanin M. L., coord.). <https://www.academie-sciences.fr/fr/Rapports-ouvrages-avis-et-recommandations-de-l-Academie/une-declaration-sur-le-changement-climatique-et-l-education-iap.html>.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (1988). <https://www.ipcc.ch/>.
- ISC, International Council for Science (2017). *A Guide to SDG Interactions : from Science to Implementation*. International Council for Science, Paris.
- Jouzel, J. and Larrouturou, P. (2017). *Pour éviter le chaos climatique et financier*. O. Jacob, Paris.
- Lee, T. M., Markowitz, E. M., Howe, P. D., Ko, C.-Y., and Leiserowitz, A. A. (2015). Predictors of public climate change awareness and risk perception around the world. *Nature Climate Change*, 5 :1014–1023.
- Lescarmontier, L. (coord.) (2018). Rapport spécial du giec. réchauffement global de 1.5 °c. résumé à destination des enseignants. Office for Climate Education, Paris. <https://www.oce.global/fr/resources/resumes-pour-enseignants/rapport-special-du-giec-rechauffement-15degc-resume-destination>.
- Lescarmontier, L. (coord.) (2020). Rapport spécial du giec. l'océan, la cryosphère et les changements climatiques. résumé à destination des enseignants. Office for Climate Education, Paris. [https://www.oce.global/sites/default/files/2020-04/OCE-RAP\\_SROCC-EN-10-WEB.pdf](https://www.oce.global/sites/default/files/2020-04/OCE-RAP_SROCC-EN-10-WEB.pdf).
- Masson-Delmotte, V. (2019). Pour une culture générale du climat. In *Les Cahiers pédagogiques*, volume 551. Février.
- NPR-IPSOS (2019). Most teachers don't teach climate change. <https://www.npr.org/2019/04/22/714262267/most-teachers-dont-teach-climate-change-4-in-5-parents-wish-they-did>.
- Office for Climate Education (2019). <http://www.oce.global>.
- Pape François (2015). Laudato si', lettre encyclique. [http://www.vatican.va/content/francesco/fr/encyclicals/documents/papa-francesco\\_20150524\\_enciclica-laudato-si.html](http://www.vatican.va/content/francesco/fr/encyclicals/documents/papa-francesco_20150524_enciclica-laudato-si.html).
- Ramanathan, V., Han, H., and Matlock, T. (2017). Educating Children to Bend the Curve. In A., B., Léna, P., Sanchez Sorondo, M., and von Braun, J., editors, *Children and Sustainable Development. Ecological Education in a Globalized World*. Springer.
- Ramanathan, V., Millar-Ball, A., Niemann, M., and Friese, S. (2019). *Bending the Curve : Climate Change Solutions*. The Regents of University of California.
- Rectorat Créteil (2019). Enquête Éducation au développement durable. [http://edd.ac-creteil.fr/IMG/pdf/edd-enquete\\_2019-20.pdf](http://edd.ac-creteil.fr/IMG/pdf/edd-enquete_2019-20.pdf).
- Rocha, M. and Wilgenbus, D., editor (2019). *Le climat entre nos mains. Océan et cryosphère, manuel à destination des enseignants du primaire et du secondaire*. Office for Climate Education, Paris. <https://www.oce.global/fr/resources/activites-de-classe/le-climat-entre-nos-mains-ocean-et-cryosphere>.
- Shift Project (2019). Mobiliser l'enseignement supérieur pour le climat. <https://theshiftproject.org/article/nouveau-rapport-mobiliser-superieur-climat/>.
- Tropicsu (2020). Climate change education, across the curricula, across the globe. <https://tropicsu.org/>.
- UN CC :Learn (2009). <https://www.uncclearn.org/>.
- Unesco (2016). *Éducation pour les peuples et la planète'. Global Education Monitoring Report 2016*. Unesco, Paris.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) (1992). <https://unfccc.int/>.
- Wallenhorst, N. and Pierron, J. P. (2019). *Éduquer en Anthropocène*. Éditions Le Bord de l'eau. 33310 Lormont.
- Zimmermann, G., Pasquinelli, E., and Farina, M. (2017). *Esprit scientifique, esprit critique. Un projet pédagogique pour l'école primaire*. Le Pommier, Paris.



**Abstract.** We live, it is said, in the age of “data science”. Machine learning (ML) from data astonishes us with its advances, such as autonomous vehicles and translation tools, and also worries us with its ability to monitor and interpret human faces, gestures and behaviors. In science, we are witnessing a new explosion of literature around machine learning, capable of interpreting massive amounts of data, otherwise known as “big data”. Some predict that numerical computation will soon be overtaken by ML as a tool for understanding and predicting dynamic systems.

No field of science is as closely related to HPC as meteorology and climate science. Their history dates back to the dawn of numerical computation, the technology that von Neumann and his colleagues pioneered in the post-war era. In this article, we will use the numerical simulation of the Earth system as an example to highlight some of the fundamental questions posed by machine learning. We will return to the history of meteorology to understand the dialectic between knowledge—our understanding of the atmosphere—and forecasting, for example the knowledge of the weather of the next day. This question is raised again today by learning, because it is not necessarily possible to interpret physically because it comes directly from the data. On the other hand, the central role of Earth system simulation to help us decipher the future of the planet and climate change, requires us to get out of the actuality of the data and make comparisons with fictitious Earths (without industrial emissions for example) and several leads to the future, what we call “scenarios”. Here observations do have a role, but it is often data from simulations that are analyzed. Finally, these climate data have a societal weight, and the democratization of access to them has grown strongly in recent years. We will show here some aspects of the evolution of simulation and data technologies and its important stakes for Earth system sciences.

**Mots-clés.** « Big data », Climatologie, Science computationnelle, Histoire de la science, Informatique, Apprentissage automatique.

## 1. Introduction : la modélisation du climat et ses futurs possibles

La science du système Terre est devenue un domaine qui a connu une grande croissance provoquée par les soucis contemporains ayant trait au changement climatique. Prenant la température moyenne globale sur la surface de la planète comme mesure de l'état climatique, on peut poser la question suivante, à quel point vivons-nous dans une époque particulière dans l'histoire géologique de la planète, et si ses variations récentes ont un précédent dans l'histoire géologique de notre planète. Pour cela, commençons par examiner les variations de température au cours des 500 derniers millions d'années, Figure 1.

Cette reconstruction de la température globale repose sur l'interprétation de nombreux proxies qui sortent du champ de cet article (Voir la discussion de cette figure dans le célèbre blog *RealClimate*,<sup>1</sup> par exemple).

Les principaux événements présentés ici ne sont pas contestés : par exemple, le maximum thermique

du Paléocène-Éocène (PETM) d'il y a environ 50 millions d'années; les grandes oscillations de température menant aux âges de glace, qui ont débuté il y a environ 1 million d'années, et la récente période de stabilité relative commençant il y a environ 10000 ans. Nous voyons, bien sûr, le bond important des températures tout à la fin du registre, représentant la période de très forte influence humaine sur la planète, à partir de la révolution industrielle. Cette augmentation de température peut nous sortir de la zone de confort de température que l'humanité a connu depuis sa sédentarisation [Xu et al., 2020], ce qui représente toute l'histoire de la vie humaine sédentaire : la scène, avec l'agriculture, les villes, et la civilisation. *H. Sapiens* précède cette « niche » humaine, certes, mais avant cette période, il était nomade, suivant le bord de la glace qui enveloppait périodiquement les masses terrestres. De nombreux événements dans l'histoire des migrations humaines coïncident avec d'importants changements climatiques, e.g. la rencontre entre Néandertaliens et humains modernes [Timmermann, 2020]. Ce n'est pas non plus la première fois que nous voyons des événements historiques qui ont un effet sur le climat mondial : l'arrivée des Européens dans le Nouveau Monde a conduit à une « grande mort » des autochtones qui a également laissé des traces sur le bilan carbone et la température [Koch et al., 2019].

<sup>1</sup><http://www.realclimate.org/index.php/archives/2014/03/can-we-make-better-graphs-of-global-temperature-history>, récupéré le 31 juillet 2020.

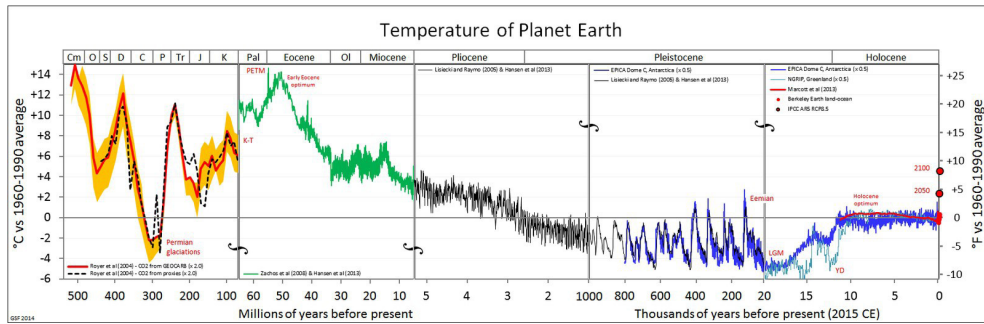


FIGURE 1. Histoire de la température de la planète. Source : *Wikipédia*.

Concentrons-nous maintenant sur l'augmentation récente de la température (Figure 1). Les grands débats autour de la politique du changement climatique tournent aujourd'hui autour des causes et des conséquences de ce changement de température, et de ce qu'il signifie pour la vie sur la planète. On sous-estime peut-être dans quelle mesure ces résultats dépendent des simulations de la planète entière : la dynamique de l'atmosphère et de l'océan, et leurs interactions avec la biosphère marine et terrestre. Nous montrons ici par exemple la figure SPM.7 du dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), paru en 2013 [Stocker et al., 2013] (le prochain rapport, AR6, est en cours de rédaction). Sur cette figure, reproduite ici (Figure 2), nous voyons la capacité des modèles à reproduire le climat du 20<sup>ème</sup> siècle. Pour le 21<sup>ème</sup> siècle, on présente deux « scénarios » : l'un, nommé RCP8.5, représentant un monde sans grand effort pour freiner les émissions de CO<sub>2</sub>, l'autre, RCP2.6 qui montre la trajectoire thermique d'un monde soumis aux politiques d'atténuation du changement climatique.

On ne remarque peut-être pas assez à quel point ces chiffres sont dûs aux modèles et aux simulations. Comme nous allons le voir, nous avons passé de nombreuses décennies à construire des modèles, qui sont principalement basés sur des lois physiques bien connues, mais dont de nombreux aspects sont encore imparfaitement maîtrisés. Les bandes colorées autour des courbes représentent une connaissance imparfaite ou une « incertitude épistémique ». Nous estimons les limites de cette incertitude en demandant à différents groupes scientifiques de construire différents modèles indépen-

dants (le nombre à côté des courbes dans la Figure 2 représente le nombre de modèles participant à cet exercice). Les dynamiques sous-jacentes sont « chaotiques », ce qui représente une autre forme d'incertitude.

Le rôle des différents types d'incertitude, tant internes qu'externes, a souvent été analysé (voir l'exemple de la Figure 4 de [Hawkins and Sutton, 2009], souvent citée). Il est étudié en exécutant des simulations qui échantillonnent toutes les formes d'incertitude. De tels ensembles de simulations sont également utilisés pour des études sur la *détection* du changement climatique dans un système à variabilité stochastique naturelle et son *attribution* à l'influence naturelle ou humaine, par exemple pour se demander si un certain événement tel qu'une canicule (par exemple, [Kew et al., 2019]), est attribuable au changement climatique. Pour de telles études, nous dépendons des modèles pour nous fournir des « contrefactuels » (des états possibles du système qui n'ont jamais eu lieu), où nous simulons des planètes Terre fictives sans influence humaine sur le climat, ce qui ne peut pas être observé.

Le rôle central de la simulation numérique dans la compréhension du système terrestre remonte à l'aube de l'informatique moderne, comme nous le décrirons ci-dessous. Ces modèles reposent sur une base solide de la théorie physique; c'est pourquoi, nous gardons confiance en eux lors de la simulation de contrefactuels qui ne peuvent pas être vérifiés par des observations. En parallèle, de nombreux projets visent à construire des machines qui apprennent, le domaine de l'intelligence artificielle. Ces deux grandes tendances de l'informatique moderne ont commencé par des débats clés entre des pionniers

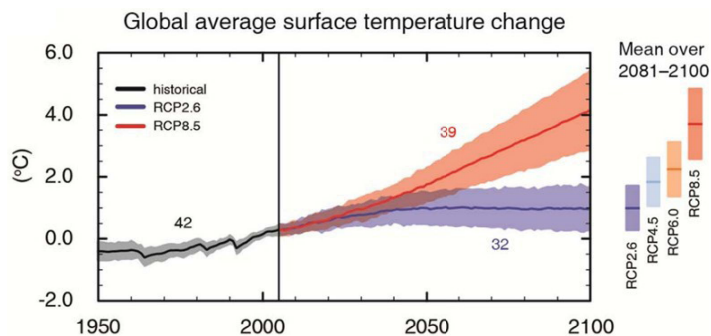


FIGURE 2. La figure SPM.7 du GIEC AR5 [Stocker et al., 2013].

tels que John von Neumann et Norbert Wiener. Nous montrerons comment ces débats se sont déroulés à l'époque où se développait la simulation numérique de la météo et du climat. Celles-ci sont réexaminées aujourd'hui, alors que nous avons les mêmes débats aujourd'hui, confrontant la science des données à la science physique, la détection des formes et motifs (« *pattern recognition* ») dans les données par rapport à la découverte de lois physiques sous-jacentes. Nous montrerons ci-dessous comment les nouvelles technologies liées aux données peuvent conduire à une nouvelle synthèse de la physique et de la science des données.

## 2. Une brève histoire du temps : les origines de la science météorologique

L'histoire de la prévision numérique de la météo et du climat coïncide presque exactement avec l'histoire de l'informatique numérique elle-même [Balaji, 2013]. Cette histoire a été racontée de façon vivante par les historiens [Dahan-Dalmedico, 2001, Edwards, 2010, Nebeker, 1995], ainsi que par les participants eux-mêmes [Platzman, 1979, Smagorinsky, 1983], qui ont travaillé aux côtés de John von Neumann à partir de la fin des années 40. Le développement de la météorologie dynamique en tant que science au 20ème siècle a été raconté par les praticiens (par exemple, Held, 2019, Lorenz, 1967), et nous n'oserions pas essayer de mieux le faire ici. Nous reviendrons sur cette histoire ci-dessous, car certains des premiers débats sont repris aujourd'hui et sont l'objet de cette enquête. Au cours des sept dernières décennies, les méthodes numériques sont devenues le cœur de la

météorologie et de l'océanographie. Pour les prévisions météorologiques, une « *révolution tranquille* » [Bauer et al., 2015] nous a donné des décennies d'avancées continues provenant de modèles numériques intégrant les équations du mouvement pour prédire l'évolution future de l'atmosphère, en tenant compte des effets thermodynamiques et radiatifs et des conditions aux limites évolutives, telles que l'océan et la surface terrestre.

Les études précurseuses de Vilhelm Bjerknes (par exemple, Bjerknes, 1921) sont souvent utilisées comme marqueur signalant le début de la météorologie dynamique, et nous choisissons d'utiliser Vilhelm Bjerknes pour mettre en évidence une dialectique fondamentale qui a animé le débat depuis le début, et jusqu'à ce jour, comme nous le verrons plus loin. Bjerknes a été le premier à utiliser des équations aux dérivées partielles (la première utilisation des « *équations primitives* ») pour représenter l'état de la circulation et son évolution temporelle, mais les solutions analytiques étaient difficiles à trouver. Les méthodes numériques étaient également immatures, notamment en ce qui concerne l'étude de leur stabilité comme l'on voit dans les tentatives infructueuses de Richardson [1922] impliquant des milliers de personnes faisant des calculs sur papier. Abandonnant enfin l'approche par équations (l'indisponibilité des données globales clés pendant la guerre y a joué un rôle aussi), Bjerknes s'est reconcentré sur la production des cartes des masses d'air et de leurs fronts [Bjerknes, 1921]. Les prévisions étaient souvent basées sur une vaste bibliothèque de cartes papier pour trouver une carte qui ressemblait au présent, et à la recherche de la séquence suivante, ce que nous reconnaissons aujourd'hui comme la méthode



analogue de Lorenz [1969]. Nebeker a commenté l'ironie que Bjerknes, qui a posé les fondements de la météorologie théorique, a également été celui qui a développé la prévision pratique avec des outils « *qui n'étaient ni algorithmiques ni basés sur les lois de la physique* » [Nebeker, 1995].

On voit ici, en la seule personne de Bjerknes, plusieurs voix dans une conversation qui continue à ce jour. D'un côté on conçoit la météorologie comme une science, où tout peut être dérivé des équations de la mécanique des fluides classique. Une seconde approche est orientée spécifiquement vers l'objectif de prédire l'évolution future du système (prévisions météorologiques) et le succès est mesuré par la compétence prévisionnelle, par tout moyen nécessaire. Cela pourrait, par exemple, être en créant approximativement des analogues à l'état actuel de la circulation et en s'appuyant sur des trajectoires passées similaires pour deviner la météo future. On peut avoir une compréhension du système sans la compétence de le prédire; on peut avoir des prédictions habiles innocentes de toute compréhension. On peut avoir une bibliothèque des données d'apprentissage, et apprendre la trajectoire du système à partir de cela, au moins dans une certaine approximation ou sens probabiliste. Si aucun analogue n'existe dans les données d'entraînement, aucune prédiction n'est possible. Ce que l'on a appelé plus tard des prévisions « *subjectives* » dépendaient beaucoup de l'expérience et du souvenir du météorologue, qui n'était généralement pas bien versé en météorologie théorique, comme le remarque Phillips [1990]. Des événements à évolution rapide en l'absence des précurseurs évidents dans les données étaient souvent absents dans les prévisions.

L'introduction par Charney d'une solution numérique à l'équation de la vorticité barotrope, et son exécution sur ENIAC, le premier ordinateur numérique opérationnel [Charney et al., 1950], a essentiellement conduit à un renversement complet de fortune dans la course entre la physique et la reconnaissance des formes. Les calculateurs programmables (où les instructions de calcul étaient chargées en même temps que des données) ont été la prochaine avancée, et le calcul de point de repère de Phillips [1956] est venu peu après.

Il n'a pas fallu longtemps pour que les prévisions basées sur des modèles numériques simplifiés surpassent les prévisions subjectives. La compétence de

prévision, mesurée (comme aujourd'hui!) par des erreurs dans la hauteur géopotentielle de 500 hPa, était nettement meilleure dans les prévisions numériques après la percée de Phillips (voir la Figure 1 dans [Shuman, 1989]). Il est maintenant considéré comme un fait parfaitement établi que les prévisions sont basées sur la physique : Edwards [2010] remarque qu'il a eu du mal à convaincre certains des scientifiques qu'il a rencontrés dans les années 90, que des décennies se sont écoulées depuis la fondation de la météorologie théorique avant que la physique heuristique simple et la reconnaissance de modèle sans théorie ne deviennent obsolètes dans les compétences en prévision.

En utilisant les mêmes méthodes exécutées pendant de très longues périodes (ce que von Neumann a appelé des « *Prévisions infinies* » [Smagorinsky, 1983]), le domaine de la simulation climatique s'  st développé au cours des mêmes décennies. Tandis que de simples arguments radiatifs pour le réchauffement induit par le CO<sub>2</sub> ont été avancés dès le XIXe siècle, la simulation numérique a permis de caractériser en détail la réponse dynamique de la circulation générale à une augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique (par exemple, Manabe and Wetherald, 1975). Des modèles de circulation océanique avaient commencé à apparaître (par exemple Munk, 1950) et démontraient des variations basse fréquence (selon les normes météorologiques atmosphériques) et l'importance du couplage océanique [Namias, 1959]. Le premier modèle couplé de Manabe and Bryan [1969] est apparu peu après. La météorologie numérique a aussi conduit par hasard à l'une des découvertes les plus profondes de la seconde moitié du 20e siècle, à savoir que même les systèmes complètement déterministes ont des limites à la prévisibilité de l'évolution future du système, le célèbre « *attracteur étrange* », marque de « *chaos* » [Lorenz, 1963]. Le simple fait de connaître la physique sous-jacente ne conduit pas à une compétence à prédire au-delà d'une limite temporelle. Bien avant Lorenz, Norbert Wiener avait déclaré que ce serait une « *mauvaise technique* » [Wiener, 1956] d'appliquer des équations différentielles lisses à un monde non linéaire où les erreurs sont grandes et la précision des observations est faible. Lorenz l'a démontré dans un système déterministe mais imprévisible de seulement trois variables, dans l'un des résultats récents les plus beaux et les plus profonds

de la physique.

Pourtant, les statistiques des fluctuations météorologiques de la limite asymptotique pourraient encore être étudiés [Smagorinsky, 1983]. En une décennie, ces modèles qui étaient les outils de base du métier pour étudier la réponse d'équilibre asymptotique du système terrestre aux changements du forçage externe, sont devenus le nouveau champ des sciences climatiques computationnelles.

Les résultats pratiques de ces études sont la réponse du climat aux phénomènes anthropiques. Les émissions de CO<sub>2</sub> ont alarmé le public avec la publication du rapport Charney en 1979 [Charney et al., 1979]. La science climatique computationnelle, avec maintenant des ramifications sociétales à l'échelle planétaire, est devenue un domaine en pleine expansion qui s'étend sur de nombreux pays et laboratoires, qui pouvaient désormais tous aspirer à l'échelle de calcul nécessaire pour étudier les implications du changement climatique anthropogène. Il n'y avait jamais assez d'informatique : il était clair, par exemple, que la représentation des nuages était une inconnue majeure dans le système (comme indiqué dans le Rapport Charney) et était (et est toujours, voir [Schneider et al., 2017]) bien en dessous de la résolution spatiale des modèles capables d'exploiter les plus puissants ordinateurs disponibles. Les modèles étaient avides de ressources, prêts à consommer tout ce qui leur est fourni pour le calcul. Une compréhension plus sophistiquée du système terrestre a également commencé à ajouter des processus dans les simulations, constituant maintenant un ensemble intégré avec la physique, la chimie et la biologie. Le coût de calcul (sans parler de l'énergie et l'empreinte carbone) de ces simulations devient non négligeable [Balaji et al., 2017]. Pourtant, des erreurs récalcitrantes subsistent. Le biais dit « *double ITCZ* », par exemple, n'a pas été éliminé malgré de nombreuses reformulations et réglages sur plusieurs générations de modèles du climat [Li and Xie, 2014, Lin, 2007, Tian and Dong, 2020]. Il est soutenu par beaucoup qu'aucun tripotage avec les paramétrisations ne peut corriger certains de ces biais « *récalcitrants* », et que seule la simulation directe est susceptible de conduire à des progrès (par exemple Palmer and Stevens, 2019, Encadré 2).

La révolution commencée par von Neumann et Charney à l'IAS, et les décennies suivantes de croissance exponentielle en informatique, ont conduit à

d'énormes progrès ainsi qu'à des indicateurs de progrès encore ambigus. Ce qui ressemblait initialement à un triomphe clair de la physique, allié aux avancées informatiques et algorithmiques, montre désormais des signes de décrochage, l'accumulation de « *détails* » dans les modèles — à la fois dans la résolution et la complexité — entraîne certaines difficultés dans l'interprétation et la maîtrise du comportement des modèles. Cela conduit à un tournant dans la science informatique du climat qui peut n'être pas moins ambitieux que celui de Princeton en 1950.

Juste au moment où l'état des lieux de l'informatique climatique a été examiné [Balaji, 2015], les contours de la renaissance des réseaux de neurones artificiels (RNA) et de l'apprentissage automatique (ML) commençaient à prendre forme. Comme indiqué dans la Section 2, les RNA existaient aux côtés des modèles de von Neumann et Charney pendant des décennies, mais peuvent avoir « languï » car la puissance de calcul et le parallélisme n'étaient pas disponibles. Les nouveaux processeurs émergeant aujourd'hui sont parfaitement adaptés au ML : le calcul typique d'apprentissage en réseaux profonds (« *deep learning* » ou DL) se compose d'une algèbre linéaire dense, parallélisable presque à volonté, capable de réduire la bande passante mémoire à précision réduite sans perte de performances. Des processeurs tels que les TPU (l'unité à traitement tensoriel) se sont montrés capables d'exécuter une charge de travail DL typique proche de la performances maximales de la puce [Jouppi et al., 2017].

Alors que les promesses des réseaux de neurones ne s'étaient pas concrétisées après leur découverte dans les années 1960 (par exemple, le modèle « *perceptron* » de Block et al., 1962), ces méthodes ont connu une résurgence remarquable dans de nombreux domaines scientifiques ces dernières années, tandis que les approches classiques stagnent. Alors que la communauté météorologique avait initialement quelque réticences pour ces outils (pour les raisons décrites dans [Hsieh and Tang, 1998]), les deux ou trois dernières années ont vu une grande efflorescence de la littérature appliquant l'apprentissage automatique (« *machine learning* », ou ML) — comme on dit maintenant — dans la science du système terrestre. Nous soutenons dans cet article que cela représente un changement radical dans la science informatique du système terrestre qui rivalise avec la révolution de von Neumann. En effet,

certaines des débats actuels autour de l'apprentissage automatique — opposant les méthodes « *sans modèle* » à « *l'IA interprétable* »<sup>2</sup> par exemple — ressemblent à ceux qui ont eu lieu dans les années 1940–1950.

### 3. Apprendre la physique à partir des données

Rappelez-vous que V. Bjerknes s'est éloigné de la météorologie théorique en constatant que les outils à sa disposition n'étaient pas suffisants pour faire des prédictions à partir de la théorie. Il est possible que l'état du calcul actuel constitue un parallèle historique, et nous nous tournerons peut-être également vers des prédictions pratiques, sans théorie. Un exemple est la prévision des précipitations à partir d'une séquence d'images radar [Agrawal et al., 2019] (essentiellement, extrapoler diverses transformations optiques telles que la translation, rotation, étirement, intensification), qui se montre compétitive vis à vis des prévisions à court terme basées sur des modèles. Les méthodes ML ont montré une compétence de prévision exceptionnelle sur de plus longues échelles de temps, y compris la percée de la « *barrière du printemps* » (c'est le nom donné à une réduction des compétences prévisionnelles dans les modèles initialisés avant le printemps boréal) dans la prévisibilité du phénomène ENSO [Ham et al., 2019]. Fait intéressant, la méthode analogue de Lorenz [1969] montre également une compétence de prévoir ENSO à plus long terme (sans barrière du printemps) par rapport aux modèles dynamiques [Ding et al., 2019], un retour aux premiers jours de la prévision décrit dans la Section 2. Ces succès et d'autres dans le domaine purement « *axé sur les données* » (bien que les articles sur l'ENSO cités ici utilisent les sorties du modèle comme données d'apprentissage) ; les prévisions ont conduit à la spéculation dans les médias que le ML pourrait en effet rendre obsolètes les prévisions basées sur la physique (voir par exemple « *Could Machine Learning Replace the*

*Entire Weather Forecast System?* »<sup>3</sup> in *HPCWire*). Des méthodes ML (dans ce cas, réseaux de neurones récurrents) se sont également montrées capables de reproduire une série chronologique à partir de systèmes chaotiques canoniques avec une prévisibilité qui va au-delà de ce que la théorie des systèmes dynamiques suggère [Pathak et al., 2018] laquelle prétend en effet être « sans modèle », ou Chattopadhyay et al., 2020). Est-ce à dire que nous sommes revenus en arrière sur la révolution de von Neumann, avec un retour aux prévisions à partir de la reconnaissance des formes plutôt que la physique? La réponse dépend bien sûr de l'hypothèse que les exemples donnés au système procurent un échantillonnage complet de tous les états possibles du système. Pour le système Terre, ceci est une proposition douteuse, car il existe une variabilité à toutes les échelles de temps, y compris celles qui dépassent la période pour laquelle nous avons des observations fiables, l'ère des satellites par exemple. Un problème clé pour toutes les approches basées sur les données est celui de la *généralisabilité* au-delà des limites des données d'apprentissage.

Passons au climat, nous examinerons les aspects des modèles du système terrestre qui bien que largement basés sur la théorie, sont structurés autour d'une formulation empirique des principes. Ces domaines sont évidemment mûrs pour une approche plus directement basée sur les données. Ces modèles sont souvent basés sur les composants paramétrés du modèle qui traitent de la « sous-grille » physique inférieure à la troncature imposée par la discrétisation. Une caractéristique clé de l'écoulement des fluides géophysiques est la cascade de turbulence tridimensionnelle continue de l'échelle planétaire jusqu'à l'échelle de longueur de Kolmogorov (voir par exemple Nastrom and Gage, 1985, Figure 1), qui doit être tronquée quelque part pour une représentation numérique. La représentation de la turbulence sous réseau basée, sur le ML est actuellement un domaine actif [Duraisamy et al., 2019]. D'autres aspects de sous-grille spécifiques à la modélisation du système Terre existent, où le ML pourraient jouer un rôle,

<sup>2</sup>L' IA, ou intelligence artificielle, est un terme que nous évitons généralement ici au profit de termes comme l'apprentissage automatique, qui mettent l'accent sur l'aspect statistique, sans impliquer une perspicacité.

<sup>3</sup><https://www.hpcwire.com/2020/04/27/could-machine-learning-replace-the-entire-weather-fore> récupéré le 31 juillet 2020.

notamment en ce qui concerne le transfert radiatif et la représentation des nuages.

Les RNA ont l'avantage immédiat d'être souvent beaucoup plus rapides que le composant qu'ils remplacent [Krasnopolsky et al., 2005, Rasp et al., 2018]. De plus, les procédures d'étalonnage de sont très inefficaces avec les modèles complets et peuvent être considérablement accélérées en utilisant des émulateurs dérivés de l'apprentissage [Williamson et al., 2013].

Le ML pose néanmoins un certain nombre de questions difficiles que nous sommes maintenant activement en train de traiter. Les problèmes habituels de savoir si les données sont représentatives et complètes, et sur la généralisabilité de l'apprentissage, continuent de se poser. Il y a une énigme à résoudre pour décider où se trouve la frontière entre le fait d'être axé sur les connaissances physiques et sur les données. Nous décrivons certaines des questions clé abordées dans la littérature actuelle. Nous prendrons comme point de départ, une composante particulière du modèle (comme la convection atmosphérique ou la turbulence dans les océans) qui est maintenant augmentée par l'apprentissage. Prenons la structure du système sous-jacent tel qu'il est maintenant, et utilisons l'apprentissage comme méthode de réduire l'incertitude paramétrique? Les méthodes émergentes nous permettent potentiellement de traiter les erreurs paramétriques et les erreurs structurelles sur une base commune (par exemple Williamson et al., 2015), mais nous pouvons toujours choisir d'être sans structure, ou tenter de découvrir la structure elle-même [Zanna and Bolton, 2020].

Si nous nous débarrassons de la structure sous-jacente des équations, nous avons un certain nombre de problèmes à résoudre. Comme l'apprentissage est au mieux aussi bon que les données d'apprentissage, nous pouvons constater que le RNA résultant viole certaines lois de base (telles que les lois de conservation) ou ne se généralise pas bien [Bolton and Zanna, 2019]. Cela peut être abordé par un choix approprié de fonctions propres sur lesquelles effectuer l'apprentissage, voir Zanna and Bolton [2020]. Une considération similaire a été observée [O'Gorman and Dwyer, 2018], où un modèle entraîné en utilisant le climat actuel, se montre incapable de se généraliser à un climat plus chaud, mais la perte de généralisation pourrait être traitée par un choix de la variable physique de base. Idéalement, nous aime-

rons aller beaucoup plus loin et apprendre réellement la physique sous-jacente.

Il y a eu des tentatives pour identifier les équations sous-jacentes pour des systèmes bien connus [Brunton et al., 2016, Schmidt and Lipson, 2009] et les efforts en cours dans le domaine de la modélisation du climat également, pour trouver des paramétrisations à partir des données. Enfin, nous posons le problème du couplage. Nous avons noté précédemment le problème de l'étalonnage des modèles, qui se fait d'abord au niveau des composants, pour amener chaque processus individuel dans les contraintes d'observation, puis dans une deuxième étape de calibration par rapport à l'ensemble du contraintes globales, telles que l'équilibre radiatif du sommet de l'atmosphère [Hourdin et al., 2017]. La question de la stabilité des RNA lorsqu'ils sont intégrés dans un système couplé est également à l'étude en ce moment (par exemple Brenowitz et al., 2020). Il faut savoir choisir d'abord l'unité d'apprentissage : serait-ce un processus individuel, ou le système entier?

#### 4. Récapitulatif

Nous avons mis en évidence dans cet article une progression historique de la modélisation du système Terre, où la révolution de von Neumann nous a permis de passer de la reconnaissance des motifs à la manipulation numérique directe des équations de la physique.

Nous avons décrit comment l'apprentissage automatique statistique de quantités massives de données offre la possibilité de s'inspirer directement d'observations pour prédire le système terrestre, une transition qui est potentiellement aussi vaste que celle de von Neumann.

À première vue, il peut sembler que nous tournons le dos à la révolution de von Neumann, passant de la physique à la simple recherche et au suivi de modèles de données. Bien que ces des approches en « boîte noire » puissent en effet être utilisées pour certaines activités, nous constatons de nombreux efforts pour s'assurer que les algorithmes d'apprentissage respectent bien les contraintes physiques même s'ils n'émergent pas directement des données. La science est bien sûr basée sur des observations. Mais « *la théorie est chargée de données, et les données sont chargées de théorie* », selon la formule prononcée par le philosophe Pierre Duhem. Edwards [2010] a



**FIGURE 3.** Le réseau mondial Earth System Grid Federation.

proposé que la même idée s'applique aux modèles : les modèles sont chargés de données, mais les données sont également chargées de modèles. Nous le voyons clairement en ce qui concerne les données climatiques qui sont souvent basées sur ce qu'on appelle la « réanalyse », un ensemble de données mondiales, créé à partir d'observations clairsemées et extrapolées en utilisant des considérations théoriques. Un résultat récent [Chemke and Polvani, 2019], intéressant, montre cette énigme, où il s'avère que les modèles du futur sont corrects mais que les données du passé (à savoir les réanalyses) sont erronées!

Le domaine a également besoin de modèles pour construire des « contrefactuels » par rapport auxquels la réalité actuelle est comparée. Cela signifie que même les algorithmes d'apprentissage doivent utiliser des résultats générés par les modèles en données d'apprentissage, plutôt que des observations. Les résultats de l'apprentissage automatique à partir de ces données simulées apprendront à les émuler, passant ainsi de la simulation à l'émulation.

Cela est déjà devenu évident dans les tendances récentes, où nous voyons des données simulées devenir de taille comparable aux quantités massives de données d'observation par satellite [Overpeck et al., 2011]. Nous voyons dans la Figure 3 la nouvelle « *vaste machine* » de données à travers le monde à partir de simulations distribuées pour le GIEC, pour l'évaluation actuelle suivant celle de la Figure 2. Il est impératif que ces données soient correctement étiquetées et stockées et donc susceptibles d'être étudiées par les outils du machine learning. Cette infrastructure de données mondiale montre les possibilités d'une nouvelle synthèse des connaissances physiques et des mégadonnées : à travers l'*émulation de données simulées*, nous tenterons d'extraire des connaissances

physiques sur l'état de la planète et la compétence de prédire son évolution future.

## Financement

V. Balaji est soutenu par le Cooperative Institute for Modeling the Earth System, Princeton Université, sous le prix NA18OAR4320123 de la National Oceanic and Atmospheric Administration, US Department of Commerce, et par l'aide d'État française *Make Our Planet Great Again* gérée par l'Agence Nationale de Recherche dans le cadre du programme « *Investissements d'avenir* » avec la référence ANR-17-MPGA-0009.

Les déclarations, constatations, conclusions et recommandations sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement les vues de l'Université de Princeton, de la National Oceanic and Atmospheric Administration, du Department of Commerce américain ou de l'Agence Nationale de Recherche française. Les auteurs déclarent n'avoir aucun intérêt concurrent.

## Remerciements

Je remercie Ghislain de Marsily, Fabien Paulot, et Raphael Dussin pour leur lecture soigneuse des versions initiales de cet article ce qui a permis d'améliorer considérablement le manuscrit. Je remercie l'Académie des sciences et les organisateurs du colloque « *Face au changement climatique, le champ des possibles* » en janvier 2020, de m'avoir accordé l'opportunité d'y participer et de contribuer à ce numéro spécial.

## Références

- Agrawal, S., Barrington, L., Bromberg, C., Burge, J., Gazen, C., and Hickey, J. (2019). Machine learning for precipitation nowcasting from radar images. <https://arxiv.org/abs/1912.12132>.
- Balaji, V. (2013). Scientific computing in the age of complexity. *XRDS*, 1 :12–17.
- Balaji, V. (2015). Climate computing : the state of play. *Comput. Sci. Eng.*, 17 :9–13.
- Balaji, V., Maisonnave, E., Zadeh, N., Lawrence, B. N., Biercamp, J., Fladrich, U., Aloisio, G., Benson, R., Cabel, A., Durachta, J., Foujols, M. A., Lister, G., Mocavero, S., Underwood, S., and Wright, G.

- (2017). CPMIP : measurements of real computational performance of Earth system models in CMIP6. *Geosci. Model Develop.*, 10 :19–34.
- Bauer, P., Thorpe, A., and Brunet, G. (2015). The quiet revolution of numerical weather prediction. *Nature*, 525 :47–55.
- Bjerknes, V. (1921). The meteorology of the temperate zone and the general atmospheric circulation. *Mon. Weather Rev.*, 4 :1–3.
- Block, H. D., Knight Jr, B., and Rosenblatt, F. (1962). Analysis of a four-layer series-coupled perceptron. II. *Rev. Mod. Phys.*, 34 :135.
- Bolton, T. and Zanna, L. (2019). Applications of deep learning to ocean data inference and subgrid parameterization. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 11 :376–399.
- Brenowitz, N. D., Beucler, T., Pritchard, M., and Bretherton, C. S. (2020). Interpreting and stabilizing machine-learning parametrizations of convection. <https://arxiv.org/abs/2003.06549>.
- Brunton, S. L., Proctor, J. L., and Kutz, J. N. (2016). Discovering governing equations from data by sparse identification of nonlinear dynamical systems. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 11 :3932–3937.
- Charney, J., Fjortoft, R., and von Neumann, J. (1950). Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, 2 :237–254.
- Charney, J. G., Arakawa, A., Baker, D. J., Bolin, B., Dickinson, R. E., Goody, R. M., Leith, C. E., Stommel, H. M., and Wunsch, C. I. (1979). Carbon dioxide and climate : a scientific assessment, National Academy of Sciences, Washington, DC. 22 pp.
- Chattopadhyay, A., Hassanzadeh, P., and Subramanian, D. (2020). Data-driven predictions of a multiscale Lorenz 96 chaotic system using machine-learning methods : reservoir computing, artificial neural network, and long short-term memory network. *Nonlinear Process. Geophys.*, 27 :373–389.
- Chemke, R. and Polvani, L. M. (2019). Opposite tropical circulation trends in climate models and in reanalyses. *Nat. Geosci.*, 12 :528–532.
- Dahan-Dalmedico, A. (2001). History and epistemology of models : meteorology (1946–1963) as a case study. *Arch. Hist. Exact Sci.*, 5 :395–422.
- Ding, H., Newman, M., Alexander, M. A., and Wittenberg, A. T. (2019). Diagnosing secular variations in retrospective ENSO seasonal forecast skill using CMIP5 model-analogs. *Geophys. Res. Lett.*, 46 :1721–1730.
- Duraisamy, K., Iaccarino, G., and Xiao, H. (2019). Turbulence modeling in the age of data. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 51 :357–377.
- Edwards, P. (2010). *A Vast Machine : Computer Models, Climate Data, and the Politics of Global Warming*. The MIT Press.
- Ham, Y. G., Kim, J. H., and Luo, J. J. (2019). Deep learning for multi-year ENSO forecasts. *Nature*, 57 :568–572.
- Hawkins, E. and Sutton, R. (2009). The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 90 :1095–1108.
- Held, I. M. (2019). 100 years of progress in understanding the general circulation of the atmosphere. *Meteorol. Monogr.*, 5 :6.1–6.23.
- Hourdin, F., Mauritsen, T., Gettelman, A., Golaz, J. C., Balaji, V., Duan, Q., Folini, D., Ji, D., Klocke, D., Qian, Y., et al. (2017). The art and science of climate model tuning. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 98 :589–602.
- Hsieh, W. W. and Tang, B. (1998). Applying neural network models to prediction and data analysis in meteorology and oceanography. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79 :1855–1870.
- Jouppi, N. P., Young, C., Patil, N., Patterson, D., Agrawal, G., Bajwa, R., Bates, S., Bhatia, S., Boden, N., Borchers, A., et al. (2017). In-datacenter performance analysis of a tensor processing unit. In *Proceedings of the 44th Annual International Symposium on Computer Architecture*, pages 1–12.
- Kew, S. F., Philip, S. Y., Jan van Oldenborgh, G., van der Schrier, G., Otto, F. E., and Vautard, R. (2019). The exceptional summer heat wave in southern Europe 2017. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 10 :S49–S53.
- Koch, A., Brierley, C., Maslin, M. M., and Lewis, S. L. (2019). Earth system impacts of the European arrival and Great Dying in the Americas after 1492. *Quat. Sci. Rev.*, 207 :13–36.
- Krasnopolsky, V., Fox-Rabinovitz, M., and Chalikov, D. (2005). New approach to calculation of atmospheric model physics : accurate and fast neural network emulation of longwave radiation in a climate model. *Mon. Weather Rev.*, 133 :1370–1383.
- Li, G. and Xie, S. P. (2014). Tropical biases in CMIP5 multimodel ensemble : the excessive equatorial Pacific cold tongue and double ITCZ problems. *J. Clim.*, 27 :1765–1780.
- Lin, J. L. (2007). The double-ITCZ problem in IPCC AR4 coupled GCMs : ocean–atmosphere feedback analysis. *J. Clim.*, 20 :4497–4525.



- Lorenz, E. N. (1963). On the predictability of hydrodynamic flow. *Trans. N.Y. Acad. Sci.*, 25 :409–432.
- Lorenz, E. N. (1967). *The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere, volume 218*. World Meteorological Organization, Geneva.
- Lorenz, E. N. (1969). Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues. *J. Atmos. Sci.*, 26 :636–646.
- Manabe, S. and Bryan, K. (1969). Climate calculations with a combined ocean-atmosphere model. *J. Atmos. Sci.*, 26 :786–789.
- Manabe, S. and Wetherald, R. T. (1975). The effects of doubling the CO<sub>2</sub> concentration on the climate of a general circulation model. *J. Atmos. Sci.*, 32 :3–15.
- Munk, W. H. (1950). On the wind-driven ocean circulation. *J. Met.*, 7 :80–93.
- Namias, J. (1959). Recent seasonal interactions between North Pacific waters and the overlying atmospheric circulation. *J. Geophys. Res.*, 64 :631–646.
- Nastrom, G. and Gage, K. S. (1985). A climatology of atmospheric wavenumber spectra of wind and temperature observed by commercial aircraft. *J. Atmos. Sci.*, 42 :950–960.
- Nebeker, F. (1995). *Calculating the Weather : Meteorology in the 20th Century*. Elsevier, Netherlands.
- O’Gorman, P. A. and Dwyer, J. G. (2018). Using machine learning to parameterize moist convection : potential for modeling of climate, climate change, and extreme events. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 10 :2548–2563.
- Overpeck, J., Meehl, G., Bony, S., and Easterling, D. (2011). Climate data challenges in the 21st century. *Science*, 331 :700.
- Palmer, T. and Stevens, B. (2019). The scientific challenge of understanding and estimating climate change. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 116 :24390–24395.
- Pathak, J., Hunt, B., Girvan, M., Lu, Z., and Ott, E. (2018). Model-free prediction of large spatiotemporally chaotic systems from data : a reservoir computing approach. *Phys. Rev. Lett.*, 120 :024102.
- Phillips, N. A. (1956). The general circulation of the atmosphere : A numerical experiment. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 82 :123–164.
- Phillips, N. A. (1990). The emergence of quasi-geostrophic theory. In *The Atmosphere—A Challenge*, pages 177–206. Springer.
- Platzman, G. W. (1979). The ENIAC computations of 1950 – Gateway to numerical weather prediction. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 60 :302–312.
- Rasp, S., Pritchard, M. S., and Gentine, P. (2018). Deep learning to represent subgrid processes in climate models. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 115 :9684–9689.
- Richardson, L. F. (1922). *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge University Press. 2007 reissue.
- Schmidt, M. and Lipson, H. (2009). Distilling free-form natural laws from experimental data. *Science*, 324 :81–85.
- Schneider, T., Teixeira, J., Bretherton, C. S., Brient, F., Pressel, K. G., Schär, C., and Siebesma, A. P. (2017). Climate goals and computing the future of clouds. *Nat. Clim. Change*, 7 :3–5.
- Shuman, F. G. (1989). History of numerical weather prediction at the national meteorological center. *Weather Forecast.*, 4 :286–296.
- Smagorinsky, J. (1983). The beginnings of numerical weather prediction and general circulation modeling : Early recollections. In Saltzman, B., editor, *Advances in Geophysics*, volume 25 of *Theory of Climate*, pages 3–37. Elsevier, Netherlands.
- Stocker, T., Qin, D., Plattner, G., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, B., and Midgley, B. (2013). *IPCC, 2013 : Climate Change 2013 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Tian, B. and Dong, X. (2020). The double-ITCZ bias in CMIP3, CMIP5, and CMIP6 models based on annual mean precipitation. *Geophys. Res. Lett.*, 47.
- Timmermann, A. (2020). Quantifying the potential causes of Neanderthal extinction : Abrupt climate change versus competition and interbreeding. *Quat. Sci. Rev.*, 238 :106331.
- Wiener, N. (1956). Nonlinear prediction and dynamics. In *Proc. 3rd Berkeley Sympos. Math. Stat. and Prob.*, pages 247–252.
- Williamson, D., Blaker, A. T., Hampton, C., and Salter, J. (2015). Identifying and removing structural biases in climate models with history matching. *Clim. Dyn.*, 45 :1299–1324.
- Williamson, D., Goldstein, M., Allison, L., Blaker, A., Challenor, P., Jackson, L., and Yamazaki, K. (2013). History matching for exploring and reducing climate model parameter space using observations and a large perturbed physics ensemble. *Clim. Dyn.*, 41 :1703–1729.

- Xu, C., Kohler, T. A., Lenton, T. M., Svenning, J. C., and Scheffer, M. (2020). Future of the human climate niche. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 117(21) :11350–11355.
- Zanna, L. and Bolton, T. (2020). *Geophys. Res. Lett.*, 47. Data-driven equation discovery of ocean mesoscale closures.



---

Facing climate change, the range of possibilities / *Face au changement climatique, le champ des possibles*

# Quelles transformations pour l'atténuation du changement climatique? Des trajectoires d'émissions mondiales à la trajectoire française

*Which transformations for climate change mitigation? From global to French emissions pathways*

Céline Guivarch<sup>a</sup>

<sup>a</sup> CIRED, Ecole des Ponts, 45bis avenue de la Belle Gabrielle, 94736 Nogent-sur-Marne cedex, France

*Courriel*: [celine.guivarch@enpc.fr](mailto:celine.guivarch@enpc.fr)

**Résumé.** Cet article prend pour point de départ l'objectif de long-terme de l'Accord de Paris de contenir l'augmentation de la température bien en-dessous de 2 °C par rapport à l'ère pré-industrielle, et les trajectoires d'émissions mondiales compatibles avec cet objectif d'atténuation. Il montre en quoi la déclinaison de ces trajectoires d'émissions mondiales à un niveau national soulève des questions d'équité. Puis il analyse la trajectoire vers l'objectif de zéro émissions nettes en 2050 que la France s'est fixée dans la Stratégie Nationale Bas Carbone. Les tendances récentes sont mises en regard de cette trajectoire-objectif, et mettent en évidence, en creux, les leviers pour réduire les émissions et les transformations que cela implique.

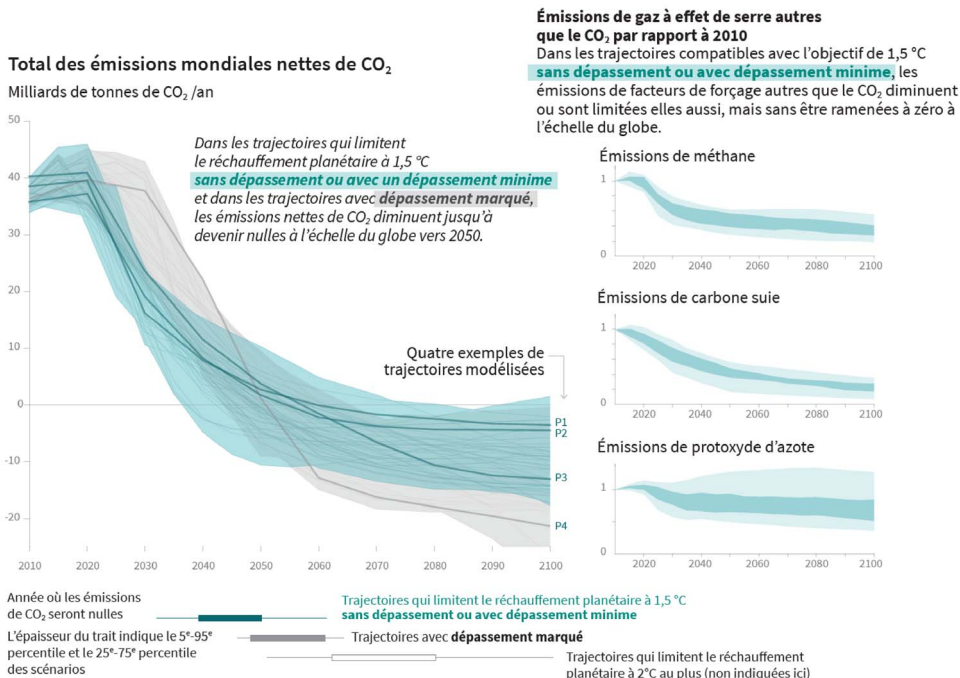
**Abstract.** This article starts from the long-term objective of the Paris Agreement on climate change to hold the increase in the global average temperature to well below 2 °C above pre-industrial levels, and the global emission pathways compatible with this objective. It shows how translating these global emission pathways into national mitigation targets raises equity issues. It then analyzes the trajectory towards net zero emissions in 2050 set out in the French National Low Carbon Strategy. Finally, recent trends are compared to the trajectory-objective, and highlight, in hollow, the levers to reduce emissions and the transformations required.

**Mots-clés.** Changement climatique, Atténuation, Scénarios, Trajectoires, France, Equité.

**Note.** Avertissement : Cet article reprend certaines données et analyses du Haut Conseil pour le Climat, dont Céline Guivarch est membre. Néanmoins le contenu de cet article n'engage en rien cette institution.

L'Accord de Paris sur le changement climatique a, en 2015, acté l'objectif de contenir « l'élévation de la température moyenne de la planète nettement en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindus-

triels et en poursuivant l'action menée pour limiter l'élévation de la température à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels, étant entendu que cela réduirait sensiblement les risques et les effets des change-



**Figure RID.3a** | Caractéristiques des trajectoires d'émissions mondiales. Le graphique principal montre les émissions mondiales nettes de CO<sub>2</sub> d'origine humaine pour des trajectoires d'émissions mondiales compatibles avec un réchauffement planétaire limité à 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minimal (moins de 0,1 °C) et des trajectoires à dépassement marqué. La zone ombrée montre l'ensemble de la fourchette pour ce qui est des trajectoires d'émissions mondiales analysées dans le présent rapport. Quant aux graphiques sur la droite, ils représentent les fourchettes d'émission de gaz à effet de serre autres que le CO<sub>2</sub> pour trois composés dont l'effet de forçage est historiquement marqué et dont les émissions proviennent pour une large part de sources distinctes de celles qui sont directement concernées par les mesures d'atténuation du CO<sub>2</sub>. Sur ces graphiques, les zones ombrées représentent l'intervalle 5-95 % (gris clair) et l'intervalle interquartile (gris foncé) pour les trajectoires d'émissions compatibles avec un réchauffement planétaire de 1,5 °C sans dépassement ou avec un dépassement minimal. Les boîtes à moustache au bas de la figure montrent à quel moment les émissions nettes de CO<sub>2</sub> deviendront égales à zéro, et aussi, à titre de comparaison, les trajectoires d'émissions mondiales correspondant à un réchauffement planétaire limité à 2 °C, avec une probabilité d'au moins 66 %. Le graphique principal met en évidence quatre exemples de trajectoires modélisées, P1, P2, P3 et P4, qui correspondent aux trajectoires LED, S1, S2, et S5 évalués au chapitre 2. Les caractéristiques de ces trajectoires d'émissions mondiales sont décrites dans la figure RID.3b (2.1, 2.2, 2.3, figure 2.5, figure 2.10, figure 2.11).

**FIGURE 1.** Source : Figure RID.3a page 15 de la traduction en français du résumé à l'intention des décideurs du Rapport Spécial du GIEC « 1,5 °C » [www.ipcc.ch/sr15/](http://www.ipcc.ch/sr15/).

ments climatiques ».<sup>1</sup> La Conférence des Parties à la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, réunie à Paris en 2015 (COP21), a également invité le Groupe d'experts Intergouvernementaux sur l'Evolution du Climat (GIEC) à présenter un rapport spécial en 2018 sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre. Le GIEC a répondu à cette invitation en publiant son rapport spécial « 1,5 °C » [GIEC, 2018], dont

le titre intégral est « rapport spécial sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le cadre du renforcement de la riposte mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté ». Dans cet article, nous nous concentrerons uniquement sur les éléments du rapport portant sur les trajectoires d'émissions mondiales de gaz à effet de serre. Le rapport a synthétisé les trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre mondiales, produites par la communauté scientifique, qui sont compatibles avec l'objectif de contenir l'augmentation de la température moyenne mondiale à 1,5 °C par rapport à l'ère préindustrielle (Figure 1). Ces trajectoires illustrent l'ur-

<sup>1</sup> Voir le texte complet de l'Accord de Paris : [https://unfccc.int/sites/default/files/french\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/french_paris_agreement.pdf)

gence à agir pour que les émissions baissent, et atteignent en quelques décennies la neutralité CO<sub>2</sub>, c'est-à-dire des émissions nettes de CO<sub>2</sub> nulles ou, dit autrement, le fait que les puits gérés par les activités humaines qui absorbent du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère (forêts, sols) contrebalancent les émissions de CO<sub>2</sub> dues aux activités humaines. Les trajectoires des autres gaz à effet de serre montrent des baisses rapides. En 2030, les émissions mondiales sont divisées environ par deux par rapport à leur niveau de 2010 dans les trajectoires compatibles avec 1,5 °C, et

réduites de 25% environ dans les trajectoires compatibles avec 2 °C. Une seconde chose importante que cette figure met en évidence, est les années où les émissions nettes de CO<sub>2</sub> deviennent nulles dans les trajectoires. Quel que soit l'objectif de stabilisation de la température, il faut atteindre cette neutralité CO<sub>2</sub>, et les émissions cumulées jusqu'à cette date d'atteinte de la neutralité conditionnent la température de stabilisation. Par exemple pour 2 °C, l'année où les émissions nettes de CO<sub>2</sub> deviennent nulles est dans la seconde moitié de ce siècle; pour 1,5 °C, elle se situe autour de 2050.

### Les émissions de gaz à effet de serre des pays du monde

Les émissions de gaz à effet de serre sont principalement liées au niveau de richesse et de développement des pays : les émissions des Etats-Unis, rapportées à la population, atteignent près de 20 tCO<sub>2</sub>-eq/personne/an, celles de l'Union européenne et de la Chine sont proches de 8 t, celles de l'Inde sont environ de 2 t et celles du Burkina Fasso par exemple se situent entre 1 et 2 tCO<sub>2</sub>-eq/personne/an [Crippa et al., 2019, Ritchie and Roser, 2017].

Les pays les plus riches (ceux classés dans la catégorie de « revenus élevés » dans la classification de la Banque Mondiale (<https://datahelpdesk.worldbank.org/knowledgebase/articles/906519>)), représentent seulement 16% de la population mondiale mais près de 40% des émissions de CO<sub>2</sub>. Tandis que les deux catégories des pays aux revenus les plus faibles représentent près de 60% de la population mondiale mais moins de 15% des émissions.

Les inégalités d'émissions entre pays développés et pays en développement se creusent si l'on passe d'une comptabilité territoriale des émissions à une comptabilité « en empreinte », dans laquelle les émissions dues à la production de biens sont réattribuées aux pays où les biens finaux sont consommés. La majorité des pays développés sont en effet importateurs d'émissions « incorporées » dans le commerce international tandis que la plupart des pays émergents et en développement en sont exportateurs [Caro et al., 2014, Peters et al., 2011]. Par exemple, pour la France, les émissions territoriales ramenées à la population représentent 6.7 tCO<sub>2</sub>-eq par habitant et par an, tandis que l'empreinte « à la consommation » (en soustrayant les émissions liées à la production de biens qui sont exportés, et ajoutant les émissions ayant lieu à l'étranger pour la production de biens importés en France) monte à 11 tCO<sub>2</sub>-eq par habitant et par an. La moyenne mondiale se situe à 6.2 tCO<sub>2</sub>-eq par habitant et par an.

Enfin, en termes de responsabilité historique du réchauffement planétaire observé aujourd'hui, la contribution des pays développés est plus importante que leur part des émissions actuelles car, ayant initié leur révolution industrielle plus tôt, ils ont participé à l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère depuis plus longtemps. Ainsi, si la Chine est aujourd'hui le premier émetteur mondial de gaz à effet de serre, avec des émissions de CO<sub>2</sub> correspondant à 27% des émissions mondiales (en comptabilité territoriale), devant les USA (15% des émissions de CO<sub>2</sub>), et l'Union Européenne (10%), ses émissions cumulées depuis 1850 représentent moins de 13% du cumul total, derrière les USA (25% du cumul) et l'Union Européenne (22%).

Le développement rapide des pays émergents, en particulier de la Chine, a réduit les inégalités d'émissions entre pays ces dernières années, mais les inégalités d'émissions au sein des pays se sont accrues dans le même temps. Ainsi, à l'échelle mondiale, les 10% des ménages les plus émetteurs sont responsables aujourd'hui d'environ 40% des émissions de gaz à effet de serre, tandis que les émissions des 40% les moins émetteurs représentent moins de 8% du total [Pan et al., 2019].

Ces trajectoires, compatibles avec l'objectif de long-terme de l'Accord de Paris, impliquent des baisses immédiates, rapides et majeures des émissions dans tous les grands secteurs. Il s'agit de trans-

formations inédites par leur ampleur. Il s'agit de transformations de tous les grands systèmes : les systèmes énergétiques, les systèmes d'usages des sols et alimentaires, les systèmes industriels, les infrastruc-

tures de transports, les bâtiments et les villes.

Traduire ces trajectoires mondiales en trajectoires d'émissions nationales revient à répartir les émissions entre pays, à se donner, explicitement ou implicitement, un critère de répartition des émissions. Définir un critère de répartition des actions d'atténuation (i.e. de réduction des émissions), et de leur financement, entre pays, est un exercice délicat, compte tenu des différentes visions de ce qui serait un critère juste [Pottier et al., 2017]. De nombreuses propositions ont été faites (par exemple une convergence des émissions par habitant vers un même niveau, une égalité des émissions cumulées par habitant, ou encore des actions d'atténuation proportionnelles au PIB des pays), mais aucune n'a pu aboutir dans le cadre des négociations internationales sur le climat. Dans le cadre de l'Accord de Paris, chaque pays définit sa contribution aux réductions d'émissions, à travers les *Nationally Determined Contributions* (NDC). Si ces NDC étaient exactement atteintes, elles conduiraient à l'horizon 2030 à une réduction des inégalités d'émissions par habitant entre pays, avec une diminution des émissions par habitant pour les principaux pays riches et une augmentation pour les pays émergents et en développement [Benveniste et al., 2018]. Néanmoins le niveau des émissions mondiales résultant en 2030 serait trop élevé pour être compatible avec l'objectif de l'Accord de Paris de contenir l'augmentation de la température moyenne mondiale bien en-deçà de +2 °C par rapport à l'ère préindustrielle. En effet, les estimations évaluent que si les NDC étaient strictement mises en œuvre les émissions mondiales en 2030 se situeraient dans la fourchette de 52 à 59 GtCO<sub>2</sub>-équivalent, soit au-dessus des niveaux des trajectoires compatibles avec les objectifs de long-terme de 2 °C et 1.5 °C, mettant en évidence un « écart<sup>2</sup> »

<sup>2</sup>A noter que cet « écart » entre l'ambition des NDC et les trajectoires compatibles avec l'objectif de long-terme de l'Accord de Paris n'est pas le seul écart qui existe. En effet, Roelfsema et al. [2020] mettent également en évidence un écart de mise en œuvre des NDC : l'évaluation des politiques et mesures d'atténuation actuellement mises en œuvre dans les différents pays du monde montre qu'elles aboutiraient à l'échelle globale à des émissions supérieures, d'environ 7 GtCO<sub>2</sub>-équivalent, à la fourchette des NDC. Les politiques et mesures en place sont donc insuffisantes, à l'échelle globale, pour ne serait-ce qu'atteindre l'ambition des NDC telles qu'annoncées.

d'environ 15 GtCO<sub>2</sub>-équivalent pour 2 °C et d'environ 30 GtCO<sub>2</sub>-équivalent pour 1.5 °C [UNEP, 2019]. Ainsi l'ambition des NDC doit être accrue pour être cohérente avec l'objectif de long terme de l'Accord de Paris. Dans cette perspective de la révision des NDC, plusieurs études [Kantha et al., 2018, Robiou du Pont et al., 2017, van den Berg et al., 2019] ont évalué les NDC actuelles à l'aune des principaux critères de partage des actions d'atténuation proposés. Pour un pays donné, ce qui constitue une « juste » contribution à l'atténuation du changement climatique, une ambition « juste », dépend du critère de justice utilisé, et revient à la question de l'allocation des émissions mondiales entre pays, avec des visions différentes de ce qui est « équitable ». Selon le critère utilisé, les émissions allouées à un pays donné varient beaucoup. Certains critères, tel qu'un critère d'émissions cumulées par habitant égales, conduisent à des budgets d'émissions négatifs pour les pays développés.

Suite à l'Accord de Paris, la France a revu son objectif de réduction des émissions, dans la Stratégie Nationale Bas Carbone.<sup>3</sup> A l'horizon 2050, l'objectif de « facteur 4 » (une division par 4 des émissions de gaz à effet de serre par rapport à leur niveau de 1990) devient un objectif de neutralité tous gaz à effet de serre confondus, aussi appelé zéro émissions nettes (ZEN). C'est un petit peu plus ambitieux que la neutralité sur le CO<sub>2</sub> pour les émissions mondiales dans les trajectoires d'émissions compatibles avec l'objectif de 1,5 °C, puisque les puits de carbone doivent alors contrebalancer non seulement les émissions résiduelles de CO<sub>2</sub>, mais aussi celles de méthane, de protoxyde d'azote et des autres gaz à effet de serre. Une ambition plus grande que la moyenne mondiale est attendue, car la France a à la fois une plus grande responsabilité dans le changement climatique observé aujourd'hui (elle a contribué à accumuler des gaz à effet de serre dans l'atmosphère depuis plus longtemps, car elle fait partie des premiers pays à avoir fait la révolution industrielle) et une plus grande capacité à agir. Néanmoins, notons que certains des critères envisagés pour « allouer » les émissions entre pays conduiraient à des trajectoires

<sup>3</sup><https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>

inférieures pour la France et des émissions nettes en 2050 négatives.<sup>4</sup>

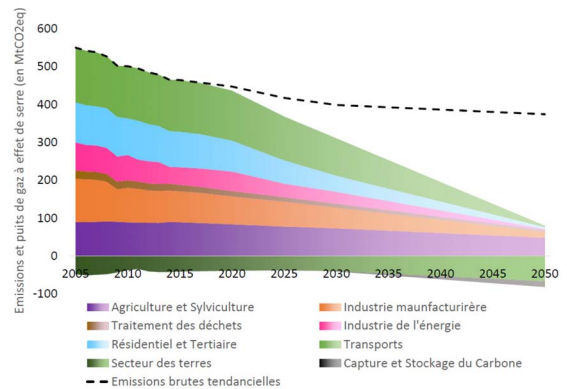
La Stratégie Nationale Bas Carbone définit également une trajectoire de réduction des émissions de gaz à effet de serre entre aujourd'hui et l'horizon 2050 et fixe des objectifs à court-moyen termes, des « marches » sur des périodes de 5 ans le long de la trajectoire, appelés les « budgets carbone ». Une décomposition par grands secteurs des émissions de la trajectoire est indiquée (Figure 2). Comme pour les trajectoires mondiales, elle implique des transformations majeures et rapides dans tous les secteurs. Les transformations sont majeures car les émissions deviennent quasiment nulles ou très faibles à long terme dans tous les secteurs. Les transformations sont rapides car, au regard des durées de vie des infrastructures, des installations industrielles, des bâtiments, 30 ans restent un horizon relativement court. Notons que le secteur des terres constitue un puits de carbone tout au long de la trajectoire envisagée, et qu'à long terme il compense l'ensemble des émissions positives résiduelles. Ce puits est constitué par l'accroissement des forêts, et des pratiques agricoles permettant de stocker davantage de carbone dans les sols.

Dans les paragraphes suivants, nous analysons les tendances récentes, au regard de la trajectoire définie dans la Stratégie Nationale Bas Carbone.

Rappelons que la France fait partie d'un groupe de dix-huit pays, dont les émissions de GES ont connu un pic dans le passé et sont maintenant en baisse depuis plusieurs années ou même décennies [Le Quéré et al., 2019], en l'occurrence pour la France depuis les années 70s. Les émissions mondiales, à l'inverse, ont été à la hausse jusqu'en 2019,<sup>5</sup> même si la vitesse d'augmentation a ralenti cette dernière décennie [Friedlingstein et al., 2019].

<sup>4</sup>Voir par exemple [www.paris-equity-check.org](http://www.paris-equity-check.org)

<sup>5</sup>Les estimations existantes pour 2020 anticipent une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> mondiales de l'ordre de 8% (<https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020>), et de l'ordre de 5-6% pour l'ensemble des gaz à effet de serre (<https://www.carbonbrief.org/analysis-coronavirus-set-to-cause-largest-ever-annual-fall-in-co2-emissions>) Ces premières estimations — établies en mai 2020 — sont bien évidemment à prendre avec prudence étant donné les incertitudes importantes quant aux développements de la crise sanitaire et économique dans la suite de l'année 2020.



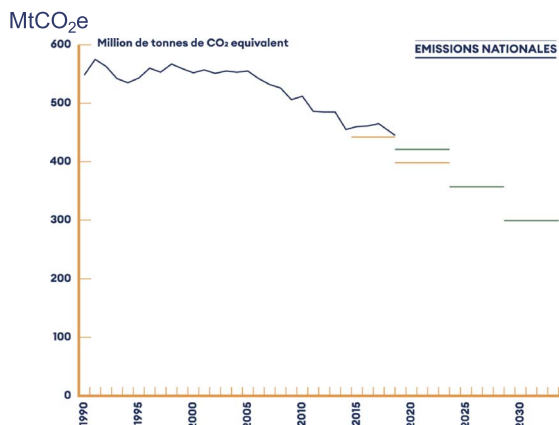
**FIGURE 2.** Trajectoire d'émissions de gaz à effet de serre sur le territoire français de la « Stratégie Nationale Bas Carbone ». Source : Stratégie Nationale Bas Carbone <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>.

Depuis 1990, point de référence notamment dans les négociations internationales sur le climat, les émissions territoriales françaises ont baissé de 19% (Figure 3). Sur la première période de la Stratégie Nationale Bas Carbone (2015–2018), elles ont connu une baisse moyenne de 1.1% par an. Cette baisse n'a pas été suffisante pour atteindre l'objectif de court terme, le premier budget carbone, la première marche sur la trajectoire vers la neutralité carbone 2050, qui a donc été manquée. Une baisse annuelle moyenne de 1.9% sur la période aurait été nécessaire pour atteindre cet objectif de court-terme. Pour respecter les prochaines « marches », les prochains « budget carbones », le rythme de baisse des émissions doit tripler d'ici 2025.

Le premier secteur émetteur de gaz à effet de serre en France est le secteur des transports qui représente plus de 30% des émissions, dont la moitié provient des voitures particulières et 40% des poids lourds et véhicules utilitaires. Ensuite, le secteur des bâtiments<sup>6</sup> compte pour 19% des émissions territoriales, dont 60% viennent des bâtiments résidentiels et les 40% restants des bâtiments tertiaires. Suivent

<sup>6</sup>Le secteur des bâtiments recouvre ici les émissions à l'usage des bâtiments tandis que les émissions à la construction sont comptabilisées dans le secteur « industrie ».





**FIGURE 3.** Trajectoire des émissions territoriales françaises de gaz à effet de serre depuis 1990, et « budgets carbone » par périodes de 5 ans de la Stratégie Nationale Bas Carbone (en orange les budgets carbone de la SNBC1, et en vert les budgets carbone de la SNBC2). Source : Rapport annuel 2019 du Haut conseil pour le climat [www.hautconseilclimat.fr/publications/rapport-2019/](http://www.hautconseilclimat.fr/publications/rapport-2019/).

les secteurs de l'agriculture et de l'industrie, qui représentent chacun environ 18% des émissions territoriales.

L'année 2020 constituera pour sûr une année en rupture avec les tendances, du fait de la crise sanitaire du Covid et de la crise économique associée. Les premières analyses estiment que les émissions de la France pourraient être réduites de 5 à 15% en 2020 par rapport à 2019,<sup>7</sup> mais restent bien évidemment très incertaines du fait de la durée et de l'ampleur de la crise qui demeurent inconnues à ce jour (juin 2020).

Nous pouvons néanmoins chercher à analyser les tendances récentes jusqu'en 2019.<sup>8</sup>

Les émissions des transports stagnent depuis environ 10 ans, et il s'agit du seul secteur dont les

<sup>7</sup>Voir Annexe du rapport du Haut conseil pour le climat « Climat et santé : mieux prévenir, mieux guérir » <https://www.hautconseilclimat.fr/publications/climat-sante-mieux-prevenir-mieux-guerir/>

<sup>8</sup>Voir le rapport annuel 2019 du Haut conseil pour le climat pour une analyse détaillée : <https://www.hautconseilclimat.fr/publications/rapport-2019/>

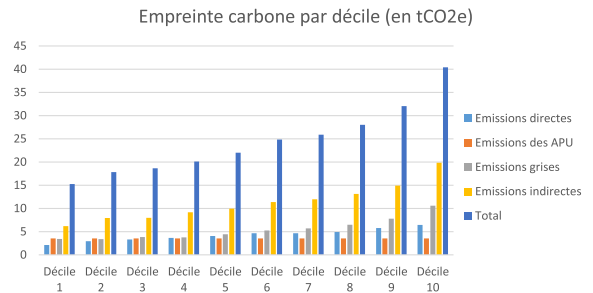
émissions en 2019 sont supérieures à leur niveau de 1990. Plusieurs éléments sous-jacents expliquent cette stagnation : (i) une poursuite de la croissance des distances parcourues, notamment des distances domicile-travail, reflet d'une poursuite du phénomène d'étalement urbain; (ii) un retard dans l'électrification des véhicules par rapport à la trajectoire envisagée; (iii) une absence de report modal, alors que cela était envisagé dans la Stratégie Nationale Bas Carbone, notamment pour le transport de marchandises de la route vers le rail; et (iv) un ralentissement dans les améliorations d'efficacité énergétique des véhicules : ces dernières années les gains d'efficacité des moteurs ont complètement été gommés par l'alourdissement des véhicules (avec l'envol des ventes de SUV notamment). En creux, ces évolutions indiquent les leviers pour réduire les émissions des transports : la réduction des distances parcourues, le report vers des modes moins émetteurs (transports publics, train) ou non émetteurs (vélo, marche), le meilleur remplissage des véhicules, le choix de véhicules efficaces, légers, qui consomment peu... les choix collectifs d'aménagement du territoire et d'investissement qui permettent justement cette réduction des distances parcourues et le report vers des modes moins émetteurs. Actionner ces leviers relève en partie de choix individuels, mais surtout de choix collectifs aux échelles locale, régionale, nationale et même européenne puisque par exemple les régulations qui portent sur les constructeurs automobiles sont décidées à l'échelle européenne.

Dans le secteur des bâtiments, les émissions diminuent, mais trois fois moins vite que prévu dans la trajectoire de la Stratégie Nationale Bas Carbone. Cela est dû à : (i) une stagnation de la consommation d'énergie des bâtiments; (ii) des rénovations énergétiques nombreuses mais peu performantes; (iii) un retard dans l'élimination des chauffages les plus carbonés, en particulier le chauffage au fioul. Le levier majeur dans ce secteur est l'accélération des rénovations énergétiques du stock de bâtiments existant, en faisant des rénovations performantes, c'est-à-dire permettant d'atteindre de très faibles consommations énergétiques. Actionner ce levier requiert de traiter la question du financement de ces rénovations énergétiques, mais aussi de développer une filière de la rénovation thermique, et les compétences nécessaires, c'est donc également un enjeu de formation et d'emploi.

Pour terminer le panorama abordons la question des puits de carbone — à savoir les forêts et les changements d'usage des sols. Ces dernières années, les puits se sont affaiblis, bien qu'ils compensent toujours environ 7% des émissions territoriales. Cet affaiblissement a deux causes sous-jacentes. D'une part, l'artificialisation des sols continue, or des sols artificialisés stockent moins de carbone. D'autre part, l'évolution du puits forestier (évolution de la superficie des forêts, de la croissance des peuplements forestiers et de leur exploitation), s'il permet toujours de capter du CO<sub>2</sub>, n'a pas permis d'en capter autant que les années précédentes. Cette évolution met en évidence un risque important le long de la trajectoire envisagée vers la neutralité carbone : celui de la résilience des forêts face au changement climatique. Avec des risques de feux accrus, de parasites et maladies, dont la progression est amplifiée par le changement climatique, la permanence du puits forestier est menacée. Ici les leviers résident dans l'arrêt de l'artificialisation des sols, la préservation du puits forestier, le changement de pratiques agricoles pour stocker davantage de carbone dans les sols.

La trajectoire de la Stratégie Nationale Bas Carbone évoquée jusqu'ici concerne les émissions dites « territoriales » de la France, c'est-à-dire celles qui ont lieu sur le territoire français, mais elles ne représentent pas l'intégralité de la responsabilité française en termes d'émissions. Tout d'abord, elles excluent les émissions du transport international. Ces émissions du transport international, si elles étaient ajoutées aux émissions territoriales, n'augmenteraient le total « que » de 6% (dont 75% correspondent au transport aérien non-domestique, et 25% au transport maritime non domestique). Pourtant, en l'absence de mesures sur le transport international, et si les autres secteurs suivent les trajectoires envisagées, elles deviendraient responsables de la majorité des émissions restantes en 2050. D'où la nécessité de prendre des mesures.

Par ailleurs, si l'on corrige les émissions territoriales des exports et des imports, c'est-à-dire que l'on soustrait les émissions qui ont lieu sur le territoire pour produire des biens qui sont exportés et que l'on ajoute les émissions qui ont lieu dans d'autres pays pour produire des biens qui sont importés en France, l'empreinte carbone de la France monte à plus de 700 millions de tCO<sub>2</sub> équivalent par an, soit près de 60% de plus que le volume des émissions territoriales.



**FIGURE 4.** Empreinte carbone des ménages français par décile de revenu. L'empreinte se décompose en émissions directes (émises au moment de la consommation), émissions indirectes (émises lors de la production du bien ou service consommé), émissions grises (induites par l'ensemble des activités en amont de la chaîne de valeur), et émissions des Administrations Publiques (APU). Les empreintes sont calculées par ménage pour prendre en compte les effets de composition au sein du foyer. Lorsque l'on raisonne par individu, l'écart entre les déciles est légèrement réduit. Données : Malliet [2020]. Source : Guivarch and Taconet [2020].

Cette empreinte carbone de la France stagne depuis 2005.

Il existe de fortes disparités dans l'empreinte carbone de la consommation des ménages (Figure 4). Le niveau de richesse d'un individu est le premier déterminant de ses émissions (les autres déterminants étant sa localisation urbaine/rurale, son âge, etc.) Ainsi, l'empreinte carbone moyenne des ménages du décile de revenu le plus élevé est presque trois fois supérieure à celle des ménages du décile le moins élevé [Malliet, 2020]. Au sein d'un décile, les empreintes carbone des ménages peuvent néanmoins varier significativement, et les inégalités géographiques — notamment entre urbain, périurbain et rural — sont également importantes.

Réduire les émissions de gaz à effet de serre implique de transformer en profondeur les modes de production et de consommation, les systèmes de déplacements, d'alimentation. Mais cela aussi peut exacerber les inégalités,<sup>9</sup> ou créer des situations de

<sup>9</sup>Voir Guivarch and Taconet [2020] pour une revue de littérature sur les liens entre inégalités et changement climatique.

pauvreté énergétique ou de pauvreté tout court. Par exemple, les politiques d'atténuation ont des effets sur les prix de l'énergie ou de l'alimentation, avec un impact sur les niveaux de vie. Une hausse du prix du carburant ou des transports est injuste pour les ménages qui, pour pouvoir se loger sans se ruiner, ont dû s'éloigner des zones concentrant les emplois et les transports publics. Il a été montré par exemple que la fiscalité sur le carbone, telle que mise en place en France et sans mesure de redistribution des revenus qu'elle génère, est régressive, c'est-à-dire que la part du budget des ménages qu'elle représente décroît en moyenne avec le revenu des ménages — elle touche donc de façon disproportionnée les ménages les plus modestes [Berry, 2019]. Pour autant, Berry [2019] a aussi montré que la redistribution d'une partie des revenus que la fiscalité carbone génère permet de rendre le dispositif progressif et d'améliorer les situations de pauvreté énergétique.

Ainsi, l'action climatique, pour être juste, ne doit pas négliger son propre impact sur les inégalités, les mesures mises en place doivent être au service d'objectifs plus vastes de développement, de réduction de la pauvreté et des inégalités, de création d'emplois décents, d'amélioration de la qualité de l'air, de la santé.

## Conclusion

En conclusion, rappelons que quel que soit l'objectif de stabilisation des effets du changement climatique, il faut atteindre la neutralité carbone. Ainsi, il n'est jamais trop tard pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, et chaque réduction d'émission permet d'éviter certains des impacts du changement climatique. Néanmoins, tant que les émissions de gaz à effet de serre à longue durée de vie (au premier rang desquels le CO<sub>2</sub>) sont positives, elles continuent de s'accumuler dans l'atmosphère et plus les actions d'atténuation sont retardées, plus les impacts du changement climatique seront importants. Pour atteindre un même objectif climatique, plus les actions sont retardées, plus la vitesse de réduction des émissions devra être rapide. Des actions retardées, cela signifie également une poursuite des investissements générateurs d'émissions, qui représenteraient d'autant plus d'actifs échoués lorsque des actions d'atténuation se mettraient en place.

Atteindre l'objectif de zéro émissions nettes que la France s'est fixé pour 2050 implique une action immédiate et forte, incluant toute la société pour une transition juste. Cela concerne l'ensemble des acteurs et l'ensemble de nos activités : comment nous nous déplaçons, nous nous logeons et nous chauffons, nous produisons et consommons... Il s'agit de mettre en œuvre une transformation de tous les grands systèmes (énergétiques, alimentaires, d'infrastructures) à une échelle sans précédent historique. Les actions d'atténuation nécessaires ne sont pas marginales, ne portent pas sur un seul aspect, et ne sont pas seulement individuelles. Il s'agit de se concentrer sur les actions qui permettent d'avancer vers une neutralité en émissions, collectivement, de façon juste et inclusive.

Il n'y a pas de « recette » unique miracle, mais une combinaison d'actions et d'instruments à mobiliser de façon systémique et cohérente (des prix sur le carbone, des réglementations, des investissements, de la recherche et développement, des formations...). Les négociations internationales sur le climat organisent la coopération entre pays sur le sujet. Mais les réductions d'émissions viennent des politiques, mesures et actions nationales et locales. Chaque action, chaque choix de consommation, de production ou d'investissement, collectif ou individuel, public ou privé, compte.

## Références

- Benveniste, H., Boucher, O., Guivarch, C., Le Treut, H., and Criqui, P. (2018). Impacts of Nationally Determined Contributions on 2030 Global Greenhouse Gas Emissions : Uncertainty Analysis and Distribution of Emissions. *Environ. Res. Lett.*, 13(1) :014022.
- Berry, A. (2019). The distributional effects of a carbon tax and its impact on fuel poverty : A microsimulation study in the French context. *Energy Pol.*, 124(janvier) :81–94.
- Caro, D., LoPresti, A., Davis, S., Bastianoni, S., and Caldeira, K. (2014). CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions embodied in international trade of meat. *Environ. Res. Lett.*, 9(11) :114005.
- Crippa, M., Oreggioni, G., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., Lo Vullo, E., Solazzo, E., Monforti-Ferrario, F., Olivier, J. G. J., and Vignati, E. (2019).

- Fossil CO<sub>2</sub> and GHG Emissions of All World Countries*. Publication Office of the European Union, Luxembourg.
- Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'Sullivan, M., Andrew, R. M., Hauck, J., Peters, G. P., et al. (2019). Global Carbon Budget 2019. *Earth Syst. Sci. Data*, 11 :1783–1838.
- GIEC (2018). Réchauffement planétaire de 1,5 °C, rapport spécial du giec sur les conséquences d'un réchauffement planétaire de 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels et les trajectoires associées d'émissions mondiales de gaz à effet de serre, dans le contexte du renforcement de la parade mondiale au changement climatique, du développement durable et de la lutte contre la pauvreté. [Publié sous la direction de V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor et T. Waterfield]. Organisation météorologique mondiale, Genève, Suisse, 32 p.
- Guivarch, C. and Taconet, N. (2020). Inégalités mondiales et changement climatique. *Revue de l'OFCE*, 165(3) :35–70.
- Kartha, S., Athanasiou, T., Cany, S., Cripps, E., Dooley, K., Dubash, N. K., and Teng Fei, T. (2018). Cascading Biases against Poorer Countries. *Nat. Clim. Change*, 8(5) :348–349.
- Le Quéré, C., Jkorsbakken, J. I., Charlie Wilson, C., Tossun, J., Andrew, R., Andres, R. J., Josep, G., Canadell, J. G., Jordan, A., Peters, G. P., and van Vuuren, D. P. (2019). Drivers of Declining CO<sub>2</sub> Emissions in 18 Developed Economies. *Nat. Clim. Change*, 9(3) :213.
- Malliet, P. (2020). L'empreinte carbone des ménages français et les effets redistributifs d'une fiscalité carbone aux frontières. *OFCE Policy brief*, 62.
- Pan, X., Wang, H., Wang, Z., Lin, L., Zhang, Q., Zheng, X., and Chen, W. (2019). Carbon Palma ratio : A new indicator for measuring the distribution inequality of carbon emissions among individuals. *J. Clean. Prod.*, 241.
- Peters, G. P., Minx, J. C., Weber, C. L., and Edenhofer, O. (2011). Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA*, 108(21) :8903–8908.
- Pottier, A., Méjean, A., Godard, O., and Hourcade, J.-C. (2017). A survey of global climate justice : from negotiation stances to moral stakes and back. *Internat. Rev. Environ. Res. Econ.*, 11(1) :1–53.
- Ritchie, H. and Roser, M. (2017). Co<sub>2</sub> and greenhouse gas emissions. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>.
- Robiou du Pont, Y., Jeffery, M. L., Gütschow, J., Rogelj, J., Christoff, P., and Meinshausen, M. (2017). Equitable Mitigation to Achieve the Paris Agreement Goals. *Nat. Clim. Change*, 7(1) :38–43.
- Roelfsema, M., van Soest, H. L., Harmsen, M., van Vuuren, D. P., Bertram, C., den Elzen, M., Höhne, N., et al. (2020). Taking Stock of National Climate Policies to Evaluate Implementation of the Paris Agreement. *Nat. Commun.*, 11(1) :1–12.
- UNEP (2019). *Emissions Gap Report 2019*. United Nations Environment Programme, Nairobi.
- van den Berg, N. J., van Soest, H. L., Hof, A. F., den Elzen, M. G. J., van Vuuren, D. P., Chen, W., Drouet, L., et al. (2019). Implications of Various Effort-Sharing Approaches for National Carbon Budgets and Emission Pathways. *Climat. Change*. février.





---

Facing climate change, the range of possibilities / *Face au changement climatique, le champ des possibles*

# Quelles transitions pour l'atténuation du changement climatique? Transformations globales, enjeux sociétaux, et leçons pour la décision

*What transitions for climate change mitigation? Global transformations, societal dimensions and insights for decision makers*

Henri Waisman<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institut du Développement Durable et des Relations Internationales, IDDRI-SciencesPo, France

Courriel: [henri.waisman@iddri.org](mailto:henri.waisman@iddri.org)

**Résumé.** Le rapport spécial du GIEC sur « un réchauffement global à 1,5 °C » met en évidence les trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre, compatibles avec l'objectif d'atténuation global de l'Accord de Paris, présente les actions d'atténuation à envisager dans l'ensemble des systèmes pour induire ces trajectoires d'émissions et analyse les synergies et possibles risques de tension entre stratégies d'atténuation et enjeux de développement durable. L'analyse met en évidence la nécessité d'atteindre des réductions drastiques d'émissions globales de dioxyde de carbone à court terme et de cibler la neutralité carbone entre 2050 et 2070, ainsi que des actions ciblées pour limiter les émissions des autres gaz à effet de serre. Pour atteindre de tels objectifs, des transformations radicales sont nécessaires dans les systèmes énergétiques, industriels, d'infrastructure et d'usage des sols. L'adoption de stratégies systémiques impliquant des paquets d'actions et de politiques, conçues en fonction des spécificités de chaque contexte et avec une perspective de long terme est indispensable pour induire ces transformations de façon cohérente avec l'atteinte des objectifs socio-économiques et de développement.

**Abstract.** The IPCC Special report on “Global Warming of 1.5 °C” identifies the greenhouse gas emissions trajectories compatible with the global mitigation goal of the Paris Agreement, presents the mitigation actions required to follow these trajectories and analyses the synergies and trade-offs with sustainable development objectives. The assessment highlights the necessity to implement drastic global carbon emissions reductions in the short term, to reach global carbon neutrality between 2050 and 2070 and to implement targeted actions to limit other greenhouse gases. To this aim, rapid and far-reaching transformations are required in energy, industrial, infrastructure and land-use systems. Adopting systemic strategies combining policy packages elaborated according to the specificities of each country context and with a long-term perspective is a requirement for ensuring that these

low-emission transformations can be compatible with the achievement of socio-economic and development objectives.

**Mots-clés.** GIEC, Atténuation, Émissions de gaz à effet de serre, Transformations, Stratégies.

Available online 14th December 2020

L'Accord de Paris sur le climat définit comme objectif de « maintenir l'augmentation de la température moyenne globale bien en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux pré-industriels et de poursuivre les efforts pour limiter cette augmentation à +1,5 °C au-dessus des niveaux pré-industriels ». Or, au moment où cet accord a été signé en 2015, peu de connaissances scientifiques solides étaient disponibles sur les spécificités d'un monde à +1,5 °C, et en particulier sur les différences par rapport à un monde à +2 °C. Les pays ont donc demandé au Groupe intergouvernemental d'experts sur l'Évolution du Climat (GIEC) de produire un rapport spécial sur le réchauffement global de +1,5 °C qui synthétise la littérature scientifique sur ce sujet émergent à destination des décideurs.

Après 2 ans de travail rigoureux mobilisant une centaine d'auteurs autour de l'analyse de plus de 6000 études scientifiques, le rapport du GIEC sur un réchauffement planétaire de 1,5 °C (SR1.5) a été publié le 8 octobre 2018 [IPCC, 2018a]. Il constitue la collection d'informations la plus à jour sur la connaissance sur le changement climatique et la base scientifique la plus légitime pour fonder toute décision sur le changement climatique.

## 1. Le changement climatique, une source fondamentale d'injustice

Le rapport SR1.5 montre que le changement climatique anthropique a atteint aujourd'hui environ +1 °C d'augmentation de la température globale par rapport à l'ère pré-industrielle, et que ses effets sont déjà visibles, entraînant de nombreux changements dans le fonctionnement du système climatique, et induisant notamment une augmentation des événements extrêmes (vagues de chaleur terrestres et marines, sécheresses, pluies torrentielles...). Ces impacts sont amenés à s'accroître avec la poursuite de l'augmentation de la température globale, qui atteindrait environ 0,2 °C par décennie, si le rythme actuel des émissions de gaz à effet de serre se poursuit. Dans ces conditions, le seuil de +1,5 °C pourrait être atteint entre 2030 et 2052.

Un monde à +1,5 °C est un monde avec davantage d'événements climatiques extrêmes et des impacts importants sur les écosystèmes, les sociétés et les économies. Ainsi un tel niveau de changement climatique induit en particulier une augmentation des températures extrêmes, en particulier au centre et à l'est de l'Amérique du Nord, en Europe centrale et du sud, en région Méditerranée, à l'Ouest de l'Asie, en Asie centrale et au sud de l'Afrique; des vagues de chaleur extrêmes fréquentes dans la majeure partie des Tropiques; des pluies intenses en Alaska, au Canada, en Europe du Nord, dans le Nord et l'est de l'Asie, ainsi que l'est de l'Amérique du Nord; une probable augmentation de l'intensité des cyclones, et donc de l'intensité des pluies associées; un possible doublement de la fréquence des événements El Niño extrêmes et donc des impacts associés à l'échelle mondiale; une augmentation des sécheresses, notamment dans la région Méditerranéenne, et une augmentation des risques de pénuries d'eau dans les régions les plus sèches (Afrique subsaharienne et Asie du Sud); des pertes de ressources côtières, induisant en particulier une diminution de la productivité des pêcheries et de l'aquaculture, notamment aux basses latitudes; une diminution des rendements de maïs, riz, blé et autres céréales, notamment en Afrique subsaharienne, Asie du Sud-Est, Amérique centrale et Amérique du Sud.

Tous ces impacts climatiques ont des effets directs sur les populations car ils touchent les conditions de vie et les moyens de subsistance. Ils induisent directement ou indirectement une augmentation de la pauvreté et un creusement des inégalités car ce sont les plus pauvres qui sont en général les plus exposés à ces impacts du changement climatique. Et ce sont aussi ces populations les plus désavantagées qui sont le moins en situation de mettre en œuvre les stratégies d'adaptation susceptibles de leur permettre d'éviter en partie ces impacts.

L'analyse du rapport du GIEC montre qu'une augmentation de 0,5 °C supplémentaire (de +1,5 à +2 °C en moyenne globale) a des conséquences importantes sur les effets décrits ci-dessus qui se trouvent renforcés au fur et à mesure que l'augmentation de



température s'accroît. Dans de nombreux cas, les impacts peuvent être plus que doublés par rapport à un réchauffement global limité à +1,5 °C. Les évaluations montrent ainsi que jusqu'à plusieurs centaines de millions de personnes en moins seront à la fois exposées aux risques climatiques et susceptibles de basculer dans la pauvreté si l'augmentation de température globale est maintenue à 1,5 °C par rapport au cas où elle atteindrait +2 °C.

Cela signifie que le contrôle du changement climatique est un enjeu fondamental de justice sociale, et que toute dérive du climat global peut être analysée comme une source d'accroissement des inégalités et de la pauvreté. Chaque dixième de degré compte dans ces tendances et tout décalage de l'action climatique globale a des effets directs ou indirects comme vecteur d'injustice.

## 2. Méthodes d'analyse des stratégies d'atténuation dans le rapport SR1.5

Trois niveaux d'évaluation sous-tendent les analyses du SR1.5 sur les trajectoires d'atténuation.

Premièrement, les trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre (GES) mondiales sont présentées telles qu'elles émergent des analyses intégrées sur la manière dont la société mondiale peut se transformer vers un avenir à faible intensité de carbone. Ces résultats sont issus principalement d'exercices de modélisation d'évaluation intégrée, complétés dans une mesure limitée par des études sectorielles et ascendantes [Rogelj et al., 2018]. De nombreux scénarios issus de la littérature scientifique, qui diffèrent dans la façon dont les émissions et les concentrations de GES sont réduites au fil du temps, éclairent cette question. Ces scénarios se distinguent spécifiquement en fonction de l'ampleur des réductions d'émissions de CO<sub>2</sub> à court terme et de l'échelle d'utilisation des solutions permettant l'élimination du dioxyde de carbone de l'atmosphère, ou solutions à « émissions négatives ». Le portefeuille de solutions envisagées dans ces analyses est large mais non exhaustif. Par exemple, parmi les solutions à émissions négatives, seuls le boisement, le reboisement (AR) et la bioénergie avec capture et stockage du CO<sub>2</sub> (BECCS) sont généralement considérés. En outre, selon les caractéristiques du modèle et les hypothèses de scénarios spécifiques, les trajectoires d'atténuation et les solutions associées peuvent varier dans

leur contenu technologique, par exemple, dans leur dépendance à l'énergie nucléaire, au captage et au stockage du CO<sub>2</sub> et aux stratégies liées au changement de comportement.

Deuxièmement, le rapport évalue la faisabilité multidimensionnelle des trajectoires d'atténuation, en identifiant les solutions disponibles, les spécificités du contexte de cette disponibilité et les changements nécessaires pour éliminer les obstacles et fournir un contexte plus large propice à un déploiement à l'échelle nécessaire pour atteindre les objectifs de réductions d'émissions [de Coninck et al., 2018]. Le SR1.5 a évalué en particulier 28 options d'atténuation selon six dimensions — économique, technologique, institutionnelle, socioculturelle, environnementale et géophysique. Chacune de ces dimensions est caractérisée, à l'aide de la littérature scientifique, à travers trois à cinq indicateurs, tels que l'acceptabilité politique, la faisabilité juridique et administrative, la capacité institutionnelle, la transparence et la responsabilité sous la dimension institutionnelle; ou les co-avantages sociaux (par exemple pour la santé, l'éducation), l'acceptation par le public, l'inclusion sociale et régionale, l'équité intergénérationnelle et les capacités humaines.

Enfin, le SR1.5 élargit l'analyse en discutant en détail de l'interaction entre les différentes options d'atténuation et d'autres objectifs et buts que la société poursuit, notamment le développement durable [Roy et al., 2018]. Cela permet de prendre en considération des dimensions liées aux objectifs sociétaux et environnementaux autres que le changement climatique. L'évaluation a été réalisée par une évaluation de la force des synergies et des risques de tensions avec les objectifs de développement durable (ODD), à l'aide d'un tableau de bord d'interaction [McCollum et al., 2018]. L'analyse fournit des informations concrètes aux décideurs pour comprendre comment aligner les options d'atténuation avec les objectifs de développement durable et ainsi améliorer le soutien public et l'acceptabilité sociale des mesures, encourager une action plus rapide et plus efficace et soutenir la conception d'une atténuation équitable.

Ces trois niveaux d'évaluation fournissent des informations complémentaires sur les trajectoires globales d'atténuation vers l'objectif de 1,5 °C. La modélisation globale peut fournir une vue quantitative et cohérente en interne basée sur l'optimi-

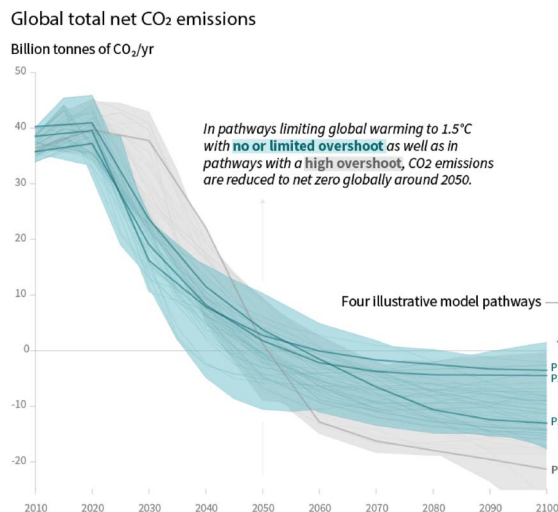
sation techno-économique, qui doit être complétée par une perspective plus pratique et ancrée sur l'évaluation de terrain pour évaluer les conditions pour que ces transformations se concrétisent réellement. Il s'agit de prendre en compte l'importance des facteurs contextuels aux niveaux régional, national et infranational. Il s'agit également de refléter l'ensemble des dimensions institutionnelles et socioculturelles, ainsi que certains indicateurs technologiques, économiques, géophysiques et environnementaux qui ne sont généralement pas globalement saisis par des études de modélisation, telles que l'évaluation des risques, les aspects distributionnels ou l'évolution technique. Il s'agit enfin de discuter des conditions plus larges qui permettent des transitions de systèmes telles que l'instrumentation politique, la finance et l'investissement, les changements de comportement, l'innovation technologique, la gouvernance à plusieurs niveaux et la capacité institutionnelle. Les deux perspectives précédentes sont complétées par le troisième niveau d'analyse, qui ajoute un examen explicite et détaillé d'un certain nombre d'objectifs clés de développement durable pour l'évaluation d'un portefeuille alternatif d'options d'atténuation. Ce dernier volet permet de mettre en discussion les interactions des différentes solutions d'atténuation avec les enjeux sociaux, économiques et environnementaux plus larges, et de mettre en évidence l'impact de différents paquets de politiques et mesures sur la nature et l'ampleur des synergies et des risques de tensions entre l'objectif d'atténuation et les objectifs plus larges de la transition.

### 3. Trajectoires d'émissions

L'analyse des scénarios compatibles avec l'objectif de stabiliser l'augmentation de la température globale en dessous de +1,5 °C permet d'identifier les trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre correspondantes.

#### 3.1. Trajectoires globales de dioxyde de carbone

Le rapport analyse en détail les enjeux posés par les émissions de dioxyde de carbone, qui est le principal déterminant du changement climatique à long terme étant donné sa longue durée de vie dans l'atmosphère. Ces émissions sont causées principalement



**FIGURE 1.** Trajectoires globales de CO<sub>2</sub> dans les scénarios compatibles avec une limitation du réchauffement global à +1,5 °C. (Source : Figure SPM.3a dans [IPCC, 2018b])

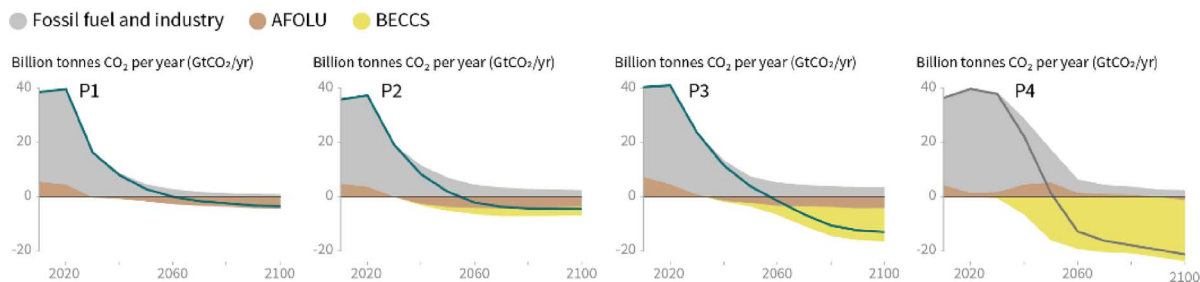
par la combustion des énergies fossiles (pétrole, gaz, charbon) notamment pour des usages énergétiques, par les changements d'usages des sols comme la déforestation et par certains procédés industriels tels que ceux impliquant la production de ciment.

La Figure 1 présente une vision d'ensemble des trajectoires d'émissions de CO<sub>2</sub> compatibles avec l'objectif de +1,5 °C, en distinguant les trajectoires qui restent en deçà de cette limite sans (ou avec un faible) dépassement temporaire du seuil de +1,5 °C avant retour à ce niveau, identifiées en bleu, et les trajectoires qui impliquent un fort dépassement temporaire en gris.

Au-delà des variabilités dépendantes d'hypothèses spécifiques sur le contexte ou les solutions de l'atténuation, des caractéristiques communes peuvent être identifiées.

Respecter le seuil de +1,5 °C nécessite dans tous les cas de réduire très fortement les émissions de CO<sub>2</sub> à court terme. L'analyse montre une réduction nécessaire dans l'intervalle de 40 à 60% en 2030 par rapport aux émissions de 2010, avec une valeur moyenne autour de 45%. Même un objectif de « seulement » +2 °C demande des ruptures significatives par rapport aux tendances actuelles pour atteindre une diminution de 20 à 25% par rapport aux émissions de

## Breakdown of contributions to global net CO<sub>2</sub> emissions in four illustrative model pathways



**FIGURE 2.** Décomposition des émissions de CO<sub>2</sub> dans les quatre familles illustratives. (Source : Figure SPM.3b dans [IPCC, 2018b])

2010. Il s'agit d'une ambition de réduction significativement plus prononcée que ce que les Etats ont engagé jusqu'alors et significativement plus forte que ce qui est inscrit dans les contributions déterminées au niveau national (CDNs) soumises par les pays en amont de l'Accord de Paris.

Respecter le seuil de +1,5 °C requiert comme condition nécessaire d'atteindre la neutralité carbone — ne pas émettre plus d'émissions que ce que les activités humaines permettent de stocker — autour de 2050. Même un objectif de « seulement » +2 °C demande d'atteindre cet objectif de neutralité carbone avec seulement un décalage possible jusque vers 2070. Dans tous les cas, l'objectif de « neutralité carbone » apparaît ainsi comme l'objectif fondamental premier de l'action climatique, car c'est la condition nécessaire pour s'assurer que les activités anthropiques cessent de causer l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Ce point est d'ailleurs reconnu explicitement dans l'article 4.1 de l'Accord de Paris. La neutralité carbone est ainsi la boussole scientifiquement légitime qui doit guider l'évaluation des politiques et mesures mises en place pour contrôler le changement climatique [Rankovic et al., 2018].

### 3.2. Quatre familles de scénarios d'atténuation

Le SR1.5 met en évidence quatre familles illustratives de trajectoires d'atténuations qui atteignent toutes l'objectif de stabilisation à +1,5 °C mais avec des sous-jacents différents qui correspondent à quatre narratifs de transition différents, associés à des types de trajectoires d'émissions de CO<sub>2</sub> contrastés (Figure 2) pour les principales sources que sont la

combustion des ressources fossiles (charbon, pétrole, gaz) pour fournir de l'énergie (en gris), la reforestation/afforestation (en marron) et les technologies à émissions négatives comme le BECCS (en jaune). Le scénario P1 est un scénario dans lequel les innovations sociales, commerciales et technologiques entraînent une baisse de la demande d'énergie avant 2050, alors que le niveau de vie augmente, en particulier dans les pays du Sud. La diminution de la taille du système énergétique réduit permet une décarbonisation rapide de l'approvisionnement énergétique. Le boisement est la seule option à émissions négatives prise en considération; ni combustibles fossiles avec CCS ni BECCS ne sont utilisés.

Le scénario P2 est largement axé sur la durabilité, avec un focus sur l'efficacité énergétique, le développement humain, la convergence économique et la coopération internationale, ainsi que la bifurcation vers des modes de consommation durables et sains, l'innovation technologique bas-carbone et des systèmes fonciers bien gérés, avec une acceptabilité sociale limitée pour le BECCS.

Le scénario P3 est un scénario intermédiaire dans lequel les développements de la société et des technologies suivent les tendances historiques. Les réductions d'émissions sont principalement réalisées en changeant la façon dont l'énergie et les biens sont produits, avec un moindre rôle pour la réduction de la demande.

Le scénario P4 est un scénario intensif en ressources et en énergie, dans lequel la croissance économique et la mondialisation conduisent à l'adoption de modes de vie à forte intensité en gaz à effet de serre, y compris une forte demande de carburants pour le transport et les produits ali-

mentaires. Les réductions d'émissions sont principalement atteintes grâce à la technologie, avec en particulier un très fort déploiement des technologies à émissions négatives, notamment BECCS. Cette famille de scénarios atteint l'objectif de stabilisation à +1,5 °C, avec un fort dépassement temporaire.

Pour chacune de ces familles, des scénarios illustratifs sont choisis pour lesquels des configurations technologiques détaillées sont fournies [IPCC, 2018b, figure SPM3.b]. Il convient cependant de noter que ces trajectoires illustratives correspondent à un choix arbitraire dans la base de données complète des scénarios et elles ne couvrent pas toutes les dimensions possibles de variations. Un examen approfondi de la base de données complète des scénarios sous-jacents à l'évaluation [Huppmann et al., 2018] est nécessaire pour comprendre toute l'étendue des tendances technologiques soutenant chacune de ces trajectoires.

### 3.3. Trajectoires globales des autres gaz à effet de serre

Le rapport analyse également en détail certains gaz à plus faible durée de vie mais qui influent notablement sur les trajectoires de température à court et moyen terme, notamment le méthane (CH<sub>4</sub>), le noir de carbone et l'oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O). Les émissions de méthane sont liées à certains processus agricoles (fermentation entérique liée à la production de viande, production de riz), à la production d'énergie fossile et à la gestion des déchets. Les émissions de noir de carbone sont des particules émises par les moteurs diesels utilisés dans le transport et l'industrie, le bois et le charbon utilisés pour les usages résidentiels, les feux de forêts et de savane et certains processus industriels. Les émissions d'oxyde nitreux sont liées à certains processus agricoles (en particulier l'usage de fertilisants), la combustion de l'énergie et certains processus industriels.

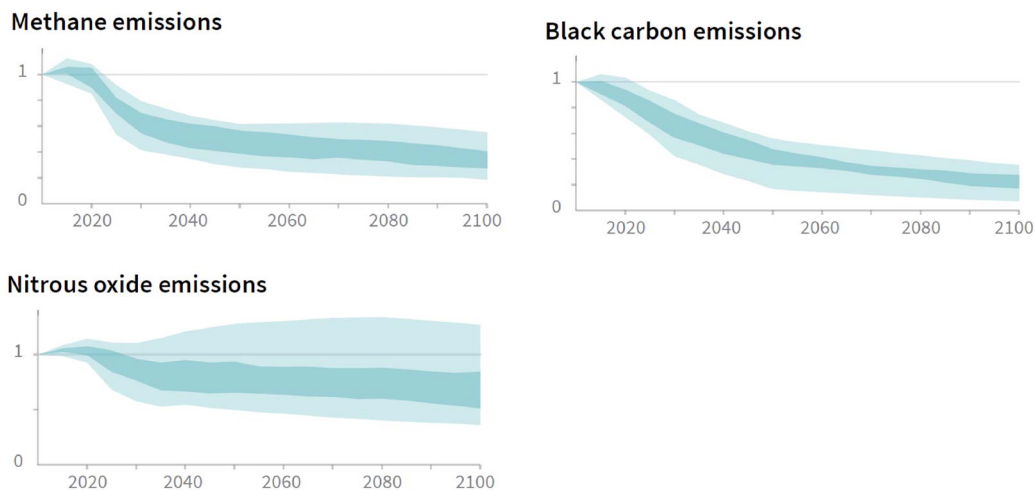
Ces émissions contribuent de façon importante au niveau maximal du réchauffement dans la période de transition. Les scénarios d'atténuation cohérents avec l'objectif de +1,5 °C avec un faible dépassement prévoient une diminution significative des émissions de méthane ainsi que des émissions de noir de carbone et une stabilisation des émissions d'oxyde nitreux (Figure 3). Dans la plupart des cas, ces réductions sont comparables avec les niveaux à

cibler pour une stabilisation à « seulement » +2 °C. Une partie importante de ces gaz sont émis en parallèle des émissions de dioxyde de carbone, de sorte que les stratégies de réduction peuvent aller de pair avec celles à considérer pour réduire les émissions de dioxyde de carbone. Cependant, pour certaines sources, il conviendra d'adopter des stratégies spécifiques complémentaires, des stratégies adoptées de toute façon pour le CO<sub>2</sub>, notamment pour les actions qui ciblent le méthane et l'oxyde nitreux liés aux activités agricoles. Il convient également de noter que certaines stratégies liées au déploiement de la bio-énergie sont associées à de potentielles augmentations significatives de certains de ces forceurs climatiques nonCO<sub>2</sub>, de sorte que les scénarios qui envisagent un très fort déploiement de ces solutions font courir un risque vis-à-vis de ces gaz à effet de serre, qui nécessitera des stratégies adaptées.

## 4. Transformations systémiques

L'analyse du rapport montre que l'atteinte de ces objectifs en émissions demande des transformations majeures et rapides dans tous les domaines (énergie, usage des terres, aménagement du territoire, urbanisme, infrastructures, industrie...). Il n'existe pas de solution unique et universelle qui permettrait d'induire les réductions d'émissions de gaz à effet de serre présentées dans la partie 3. De telles réductions impliquent des transformations économiques, technologiques [Waisman et al., 2019a], sociales, organisationnelles, institutionnelles de grande ampleur dans l'ensemble des systèmes : système énergétique, système industriel, système d'infrastructure et de transport et système d'usage des sols. Ces transformations impliquent à leur tour de recourir à un large éventail de mesures d'atténuation, parmi lesquelles des investissements massifs, des instruments politiques adéquats, une accélération de l'innovation et des changements de comportements.

Le rapport fournit des précisions détaillées sur l'ampleur et les caractéristiques des transformations à cibler à l'échelle globale, qui peuvent servir de guide pour évaluer la cohérence des actions entreprises avec l'objectif climatique affiché. Il distingue des changements incontournables comme le déploiement massif des énergies renouvelables, la sortie des énergies fossiles pour la production d'électricité à l'horizon 2050, le déploiement à grande échelle



**FIGURE 3.** Trajectoires globales de méthane, noir de carbone et oxyde nitreux dans les scénarios compatibles avec une limitation du réchauffement global à +1,5 °C, avec un faible dépassement. (Source : Figure SPM.3a dans [IPCC, 2018b])

de nouvelles technologies dans l'industrie et le bâtiment, le renouvellement rapide du stock de véhicules pour sortir rapidement des moteurs thermiques, les changements d'organisation spatiale dans les villes et dans l'usage des sols agricoles.

Dans tous, les cas la baisse des émissions est assurée entre autres par une décarbonation massive du secteur de l'énergie et une utilisation massive des énergies décarbonées pour satisfaire la demande finale, notamment via l'électrification des usages qui le permettent. L'usage du charbon est presque totalement abandonné à horizon 2050. Le gaz et le pétrole pourraient continuer à être présents dans le mix énergétique mondial mais, dans tous les cas, avec de fortes réductions par rapport à leur rôle actuel et sous certaines conditions. Par exemple, le gaz ne représenterait ainsi que 8% de la génération d'électricité mondiale, en moyenne dans les scénarios, et ce seulement à condition de le coupler avec des technologies de captage et séquestration du carbone. La demande devrait donc être satisfaite, essentiellement grâce aux énergies renouvelables, en poursuivant et en amplifiant les avancées substantielles récentes liées notamment à l'éolien, au solaire et aux technologies de stockage de l'énergie. Selon le scénario considéré, il faudrait par ailleurs consacrer entre 1 et 7 millions de km<sup>2</sup> aux cultures destinées aux biocarburants, avec des enjeux et contraintes entre énergie et sécurité alimentaire.

Dans le secteur de l'industrie, les émissions doivent être réduites de 65 à 90% en 2050 par rapport à leur niveau de 2010. Ces réductions ne peuvent être atteintes seulement via des mesures d'efficacité énergétique et demandent de mobiliser également une combinaison de technologies et de pratiques existantes et de solutions innovantes, comme l'électrification, l'hydrogène, l'utilisation de matières premières naturelles durables, la substitution de produits et l'utilisation de technologies de captage, séquestration et usage du carbone. Toutes ces solutions ont été démontrées, mais leur déploiement à l'échelle requise demande de dépasser les contraintes économiques, financières, de capacités humaines et des institutions dans certains contextes et les caractéristiques spécifiques de certaines installations de grande ampleur.

La transition du système urbain et d'infrastructures cohérent avec l'objectif de stabilisation à +1,5 °C implique notamment des changements dans les styles de développement urbain et les modalités d'usage des sols associés dans les villes; des réductions d'émissions substantielles sont également requises dans le secteur du transport et du bâtiment. Les mesures techniques incluent différentes actions pour induire de l'efficacité énergétique et une augmentation significative des usages électriques qui atteignent par exemple 55 à 75% de la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment. Le rôle

des énergies bas-carbone augmente très significativement dans le transport, pour passer d'un rôle très minoritaire aujourd'hui à une part majoritaire à l'horizon 2050. Pour diffuser ces solutions, il conviendra de prendre en considération les possibles barrières économiques, institutionnelles et socio-culturelles ainsi que les spécificités des contextes nationaux, régionaux et locaux, les capacités et les contraintes liées à la disponibilité de capital.

Les stratégies d'atténuation cohérentes avec l'objectif de stabilisation à +1,5 °C impliquent des changements importants dans les usages des sols qui soulèvent des défis importants en termes de compétitions entre usages des sols pour l'agriculture, la production d'énergie et les émissions négatives. L'ampleur et la nature de ces compétitions dépendront fortement des stratégies globales adoptées. L'évolution des pratiques agricoles, la préservation des écosystèmes et les changements de demandes alimentaires sont des aspects fondamentaux à considérer pour aligner les objectifs climatiques avec les enjeux de production alimentaire et de préservation de la biodiversité. Ils posent de nombreux défis pour la gestion durable des différents usages des sols (socio-économiques, institutionnels, technologiques, financiers, environnementaux). La recherche de solutions qui maximisent les synergies entre la réduction des émissions et la réduction des risques est une clé pour une transition juste et équitable, notamment dans les systèmes agricoles, qui demande un ancrage dans les spécificités et l'expérience locales et requiert d'adopter une approche dynamique et adaptative, dans un contexte d'incertitude.

## 5. Cohérence avec les objectifs de développement durable

Un enjeu fondamental pour l'évaluation de l'action climatique est sa cohérence avec les objectifs fondamentaux de la société, en particulier l'éradication de la pauvreté et la réduction des inégalités dans toutes leurs formes.

Le rapport analyse les synergies et les possibles effets antagonistes entre les mesures adoptées pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et les objectifs de développement durable. Cette analyse est fondamentale pour juger les mesures prises pour contrôler le changement climatique, car des mesures qui permettraient de limiter les émissions au prix

d'effets négatifs importants sur le développement ne feraient que déplacer le problème de justice sociale sans le résoudre.

Le rapport montre que de nombreuses options, si elles sont correctement mises en œuvre, présentent d'importantes synergies avec les objectifs de développement durable : amélioration de la qualité de l'air, de la sécurité alimentaire et des ressources en eau, maintien des services écosystémiques, réduction des risques de catastrophes, diminution de la pauvreté et des inégalités, etc. Néanmoins, des projets mal conçus ou mal mis en œuvre peuvent avoir des effets négatifs. Par exemple, un vaste déploiement des cultures de bio-carburant et d'afforestation peut entrer en compétition avec la production alimentaire, mais également avec la préservation de la biodiversité. Ou encore, l'abandon rapide des énergies fossiles peut représenter un risque de transition important pour les régions qui en dépendent fortement pour les revenus et les emplois.

Au total, l'analyse montre que les synergies sont plus nombreuses que les risques d'effets antagonistes et qu'un choix de mesures adéquates peut permettre de maximiser les effets bénéfiques de l'action climatique pour le développement. Le rapport identifie un certain nombre de conditions fondamentales pour favoriser ces synergies et ainsi permettre l'alignement de la protection du climat et des objectifs sociaux et environnementaux. L'action des États devra ainsi être évaluée à l'aune de la cohérence avec ces conditions structurelles, au-delà du détail des choix faits par chacun.

Tout d'abord, mettre en place des mesures urgentes assurant une inflexion rapide des émissions permet de garder ouverte la possibilité de faire des choix dans le futur et limite le risque d'arbitrage douloureux entre différents objectifs. Ensuite, l'ensemble de la société doit être impliquée — autorités nationales et sous-nationales, société civile, secteur privé et communautés locales — car une transition harmonieuse requiert en effet une action concertée qui mobilise l'ensemble des leviers qui sont dans les mains de ces différents acteurs. De plus, les combinaisons de mesures choisies pour induire les transformations doivent être intégrées au sein de stratégies articulées et bien pensées en fonction des spécificités du contexte, car c'est à chaque pays de définir son propre chemin vers la neutralité carbone. Enfin, la coopération internationale est déterminante pour

assurer l'efficacité et l'équité de la transition, à la fois pour s'appuyer sur les bénéfices de la collaboration pour faire émerger des solutions à moindre coût et pour permettre l'accès de tous au financement, aux technologies et aux renforcements de leurs capacités.

## 6. Conclusion

Le rapport du GIEC sur le réchauffement global à +1,5 °C permet de mettre en évidence l'ampleur des changements à mettre en œuvre pour mener à bien des stratégies d'atténuation à même de stabiliser le climat. Il donne des indications sur la direction à suivre et identifie les défis spécifiques qu'il conviendra de relever. Ce rapport ne fournit pas d'évaluation spécifique sur les attentes spécifiques vis-à-vis de chaque État, car cela sortirait du mandat du GIEC d'être pertinent pour la décision sans être prescriptif. De surcroît, les objectifs globaux ne permettent pas de déduire directement et simplement les objectifs qui incomberaient à chaque pays. La seule base scientifique solide pour juger si l'action d'un État est en ligne avec l'objectif global est d'évaluer si les transformations mises en œuvre sont cohérentes avec les exigences de transformations telles que décrites en détail dans le rapport, en tenant compte des circonstances nationales spécifiques de chacun.

Un tel exercice est au cœur des processus à l'échelle internationale dans le cadre de l'Accord de Paris, qui invite les pays à soumettre leurs Contributions Déterminées au niveau National décrivant leurs ambitions et leurs actions et à les réviser régulièrement en fonction des avancées de la connaissance scientifique. Le rapport est clair sur le fait que les engagements actuels sont insuffisants en l'état pour atteindre l'objectif global défini dans l'Accord de Paris et que les révisions à venir seront cruciales pour favoriser cet alignement via des stratégies nationales plus ambitieuses. La définition de telles stratégies par les pays demande d'adopter une approche analytique adaptée à ces défis d'intégration entre échelle globale et ancrage local, entre enjeux de long terme et action de court terme, entre transformations sectorielles profondes et approche systémique d'ensemble [Waisman et al., 2019b].

Le rapport du GIEC sur le réchauffement global à +1,5 °C fournit ainsi des indications sur les directions à suivre, mais ne donne pas de solutions « clés en main » pour les atteindre. En effet, la mise en œuvre

pratique et la traduction en mesures concrètes applicables aux différentes échelles ne peuvent répondre à une logique systématique et généralisable, mais demandent au contraire une déclinaison de ces grandes orientations en fonction des spécificités de chaque contexte. La mise en politique recèle des défis importants en pratique car elle dépend d'une appropriation par l'ensemble des acteurs des enjeux et des choix à opérer, de la mise en place de processus de gouvernance innovants pour permettre l'implication dans le processus de décision de l'ensemble de ces acteurs concernés et de l'élaboration de paquets de politiques et mesures permettant de répondre à court terme aux défis du long terme dans un contexte de forte incertitude qui met au défi le processus de prise de décision. Des progrès importants ont été effectués sur ces différentes dimensions ces dernières années, avec une accélération depuis l'Accord de Paris, mais force est de constater que le mouvement n'est pas encore à la hauteur du défi et que le temps presse si on veut garder ouverte la fenêtre d'opportunité pour une action vraiment ambitieuse sur le climat. La façon dont les exigences de transformation identifiées dans le rapport du GIEC seront prises en considération dans la conception des mesures prises en réponse à la crise liée au COVID-19 sera, à ce titre, révélatrice de la centralité effective des enjeux climatiques dans les prises de décisions dans différents contextes, au-delà des discours fédérateurs.

## Remerciements

Ce travail a été soutenu par l'Agence Nationale de la Recherche du gouvernement français au travers du programme d'Investissements d'avenir [ANR-10-LABX-14-01].

## Références

- de Coninck, H. et al. (2018). Strengthening and implementing the global response. In *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the c. IPCC Spec. Rep. Glob. Warm. 1.5 °C*.
- Huppmann, D., Rogelj, J., Kriegler, E., Krey, V., and Riahi, K. (2018). A new scenario resource for integrated 1.5 °C research. *Nat. Clim. Change*, 8 :1027–1030.



- IPCC (2018a). *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*. Masson-Delmotte, V. et al. (eds).
- IPCC (2018b). Special report on 1.5 degrees : Summary for policymakers. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15\\_SPM\\_version\\_report\\_LR.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf).
- McCollum, D. et al. (2018). Energy investment needs for fulfilling the Paris Agreement and achieving the Sustainable Development Goals. *Nat. Energy*, 3 :589–599.
- Rankovic, A. et al. (2018). La neutralité carbone, défis d'une ambition planétaire. <https://www.iddri.org/sites/default/files/PDF/Publications/Catalogue%20Iddri/Etude/20180925-ST1018-neutralite%CC%81carbone.pdf>.
- Rogelj, J. et al. (2018). Mitigation pathways compatible with 1.5 °c in the context of sustainable development. In *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the c. IPCC Spec. Rep. Glob. Warm. 1.5 °C*. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15\\_Chapter2\\_Low\\_Res.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter2_Low_Res.pdf).
- Roy, J. et al. (2018). Sustainable development, poverty eradication and reducing inequalities. In *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the c. IPCC Spec. Rep. Glob. Warm. 1.5 °C*. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15\\_Chapter5\\_Low\\_Res.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_Chapter5_Low_Res.pdf).
- Waisman, H., De Coninck, H., and Rogelj, J. (2019a). Key technological enablers for ambitious climate goals : insights from the IPCC special report on global warming of 1.5 °C. *Environ. Res. Lett.*, 14(11).
- Waisman, H. et al. (2019b). A pathway design framework for national low greenhouse gas emission development strategies. *Nat. Clim. Change*, 9(4) :261.



---

Facing climate change, the range of possibilities / *Face au changement climatique, le champ des possibles*

## Anticiper l'évolution des territoires

### *Anticipating the evolution of territories*

Hervé Le Treut<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Institut Pierre-Simon Laplace et Académie des sciences, Sorbonne Université, Code 101, 4 Place Jussieu 75252 Paris 05, France

Courriel: [Letreut@ipsl.jussieu.fr](mailto:Letreut@ipsl.jussieu.fr)

**Résumé.** Ne pas laisser la planète se réchauffer à un niveau qui dépasse de plus de 1,5° la valeur qui était celle de la période préindustrielle, est impératif si l'on s'en tient aux risques qui pèsent sur les territoires les plus vulnérables. Mais la possibilité d'y parvenir est considérablement plus restreinte qu'elle ne l'était il y a 30 ans, juste avant le sommet de la Terre de Rio en 1992. Les émissions de CO<sub>2</sub> étaient alors de 5 à 6 milliards de tonnes de carbone par an — elles ont doublé depuis cette date. De fait, nous avons déjà considérablement engagé le futur, comme en témoignent des phénomènes tels que la fonte des glaciers et de la banquise, le réchauffement en profondeur des océans, ou l'évolution des écosystèmes. La situation est plus grave encore, si l'on se réfère au futur proche : le réchauffement des quelques prochaines décennies est déjà fortement contraint par les émissions passées et le mélange rapide des gaz à effet de serre par la circulation atmosphérique en fait un problème mondial grandissant qui s'impose à tous. Nous avons de moins en moins la possibilité de modifier significativement l'évolution climatique locale au travers de nos propres actions. Il est donc nécessaire de s'adapter progressivement à des évolutions qui relèvent à la fois de la part déjà irrémédiable des changements à venir et des retards ou échecs des actions internationales. Les territoires ont, dans ce cadre, un rôle privilégié à jouer. C'est, en effet, à leur échelle que se développent les impacts majeurs des changements climatiques et que se fait une grande part des émissions de gaz à effet de serre. C'est donc à ce niveau que devront s'élaborer des stratégies de co-bénéfice entre atténuation et adaptation au changement climatique. Et c'est donc aussi là que devront se définir des arbitrages entre différents usages des sols, différentes stratégies de protection de la biodiversité, ou différentes gestions de zones vulnérables, telles les villes, les montagnes ou les littoraux. Ceci impose aussi une connaissance approfondie et pluridisciplinaire de ces territoires qui sont tous différents les uns des autres. L'exemple de la Nouvelle-Aquitaine, au sein de laquelle le projet Acclimaterra a mis en œuvre une série très large de visites régionales (<http://www.acclimaterra.fr>) montre qu'il est nécessaire de prendre la mesure des évolutions en cours, à la fois en écoutant l'expression des divers impératifs sociaux et en facilitant la prise de décisions de l'ensemble des acteurs régionaux par une « mise en récit » du diagnostic scientifique. Le projet Acclimaterra a aussi été matérialisé par la production de deux rapports qui ont rassemblé 400 scientifiques et ont été publiés sous la forme de livres soigneusement édités pour permettre d'atteindre le grand public. Ce travail a montré que les régions, en profitant du lien qui les unit à leur population, peuvent ainsi constituer un lien important d'innovation et de réflexion et apporter des éléments de solution importants au problème climatique.

**Abstract.** In the middle of the last century, the emergence of a new risk, the climate risk, was a sudden and largely unexpected phenomenon that has significantly changed our vision of environmental issues. Of course, the link between humans and nature is strong and ancient: a country like France has very few landscapes that have not been shaped by generations of builders, foresters or farmers.

But climate change linked to greenhouse gas emissions has brought about a radically new problem, whose novelty results from its very nature. The risk of climate change was revealed by equations or very indirect observations, before it was even really observable. But the speed of its progression, with greenhouse gas emissions in the atmosphere which have so far never stopped increasing and accelerating their growth, has made a huge difference. Moreover, this evolution has developed in a context where it has been intimately intertwined with other rapidly changing issues: energy, environmental, social, political and demographic. However, despite the variety of warning signals put forward by the scientific community, despite the now widely shared recognition of the existence of strong climate challenges, the dynamics with which these changes have developed, very often remain underestimated and even misunderstood. Climate risk is still very often associated with a certain form of immobility, marked by the repetition of discourse that gives the impression that the stakes have changed little over the last few decades. This incomplete awareness is one of the most important brakes on the development of effective environmental policies, because it erases an essential dimension of current climate issues: we are facing a problem that is very advanced in its development and everything is no longer possible today. The future world will necessarily be marked by the need to arbitrate between partially contradictory issues.

**Mots-clés.** Changement climatique, Territoires vulnérables, Emission de gaz à effet de serre, Acclimata-tion, Stratégies internationales, Multidisciplinarité, Anticipation.

## 1. Introduction

L'irruption, au milieu du siècle dernier, d'un risque nouveau, le risque climatique, a constitué un phénomène soudain, très largement inattendu, qui a modifié de manière importante notre vision des enjeux environnementaux. Bien sûr, le lien entre les humains et la nature est fort et ancien : un pays comme la France comporte très peu de paysages qui n'aient été façonnés par des générations de bâtisseurs, de forestiers ou d'agriculteurs. Mais les changements climatiques liés aux émissions de gaz à effet de serre ont apporté un problème radicalement nouveau : par sa nature même, révélée par des équations ou des observations très indirectes, avant même d'être réellement observable ; et par la vitesse de sa progression, les émissions de gaz à effet de serre dans l'atmosphère n'ayant jusqu'à présent jamais cessé d'augmenter et d'accélérer leur croissance. Cette évolution s'est par ailleurs développée dans un contexte où elle a été intimement mêlée à d'autres enjeux en évolution rapide : énergétiques, écologiques, sociaux, politiques, démographiques.

Pourtant, malgré la variété des signaux d'alerte mis en avant par la communauté scientifique, malgré la reconnaissance désormais largement partagée de l'existence d'enjeux climatiques forts, la dynamique avec laquelle ces changements se sont développés reste très souvent sous-estimée, ou tout du moins mal comprise. Le risque climatique est encore très souvent associé à une certaine forme d'immobilisme, marquée par la répétition de discours qui donnent le sentiment que les enjeux ont finalement peu changé au cours des dernières décennies.

Cette prise de conscience incomplète constitue l'un des freins les plus importants au développement de politiques environnementales efficaces, car elle efface une dimension essentielle des enjeux climatiques actuels : nous sommes face à un problème très avancé dans son développement et tout n'est plus possible aujourd'hui. Le monde futur sera nécessairement marqué par la nécessité d'arbitrage entre des enjeux partiellement contradictoires.

Le texte qui suit est articulé en deux temps un peu différents, qui se rejoindront dans la conclusion. Il s'agit de :

- Donner quelques repères pour mieux apprécier la rapidité des évolutions climatiques, et la complexité des choix de décisions auxquels elle conduit.
- Montrer que les lieux qui sont souvent désignés comme des « territoires », et qui sont donc, dans l'acception que l'on donne souvent à ce terme, des lieux de vie et de travail, portent déjà la marque de ces changements environnementaux, avec toutes les complexités et les contradictions qui s'y croisent. Et ces territoires portent donc, sans doute aussi, une part des solutions futures, parce que ce sont des lieux à la fois proches des citoyens, et confrontés à des nécessités de décisions et d'arbitrages souvent difficiles, qui conditionnent la mise en œuvre des politiques environnementales.

### 1.1. *Le changement climatique : une très courte histoire*

On entend souvent l'idée que l'enjeu climatique est présent depuis longtemps et que l'on doit à la seule incurie des gouvernements sa prise en compte lente et tardive. Quoi que l'on puisse penser par ailleurs des gouvernements mondiaux, cette description est erronée.

On fait, en effet, très souvent remonter cette prise de conscience climatique aux travaux du prix Nobel de chimie suédois Svante Arrhenius en 1903, qui avait calculé dès 1896 qu'un doublement du CO<sub>2</sub> atmosphérique pourrait augmenter la température de la planète de 4 à 5 degrés Celsius. C'était une évaluation cohérente avec les calculs récents, même si elle était sans doute un peu chanceuse. Mais il s'agissait là d'une démarche très éloignée de ce que l'on pourrait appeler aujourd'hui une alerte : le doublement du CO<sub>2</sub> était attendu par Arrhenius dans 3000 ans environ, et il était vu comme une évolution positive, protégeant une humanité à la démographie croissante des effets d'une possible glaciation.

Un article des professeurs Roger Revelle et Hans Suess (de l'Université de Californie), paru en 1957, est aussi très souvent cité, et à juste titre, comme le véritable point de départ de l'alerte scientifique sur les émissions de CO<sub>2</sub>. Il montrait que l'océan n'absorberait pas la totalité du CO<sub>2</sub> injecté dans l'atmosphère par l'utilisation des combustibles fossiles. A cette époque, il s'agissait d'environ 1 milliard de tonnes de carbone chaque année, soit déjà beaucoup, mais à peu près 10 fois moins que maintenant. L'article montrait que cette limite océanique impliquerait une augmentation du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère — et la création en 1957 d'un observatoire sur les pentes du plus haut volcan hawaïen, le Mauna Loa, avait avant tout pour but de vérifier que ce surplus de CO<sub>2</sub> était mesurable. C'est donc dans les années 60 que sont venues les premières preuves que les niveaux de CO<sub>2</sub> atmosphérique augmentaient effectivement.

Les difficultés d'appréhension du rôle des gaz à effet de serre ne s'arrêtent pas là. La mémoire que l'on a gardée de ces années 70, où s'est progressivement formé un diagnostic scientifique qui ne changera plus par la suite, est souvent affectée par un mythe tenace qui voudrait qu'à cette époque, la communauté scientifique ait été unanime à prédire un refroidissement climatique global. Une étude portant

sur l'ensemble des articles évalués par les pairs et publiés entre 1965 et 1979, a été effectuée en 2008 pour relayer et approfondir une analyse portée par le GIEC en 2007 [Le Treut et al., 2007]. Un chercheur nord-américain, Thomas Peterson (NOAA / National Climatic Data Center), et ses collègues [Peterson et al., 2008] ont constaté que 44 de ces articles présentaient des arguments en faveur d'un réchauffement futur, 20 étaient « neutres » (ne tranchaient pas sur les mécanismes susceptibles de l'emporter dans le futur) et 7 présentaient les éléments pouvant être à l'origine d'un refroidissement. Le nombre des articles publiés avait augmenté constamment pendant toute la période analysée, en s'orientant toujours plus vers le réchauffement. Ces chiffres décrivent en fait une communauté scientifique qui, vers la fin des années 70, était encore en plein débat, mais se dirigeait de plus en plus clairement vers un consensus sur le risque de réchauffement futur, alors que les émissions de CO<sub>2</sub> commençaient à dominer les autres facteurs climatiques, tels que le rôle des aérosols.

La quantification la plus importante, à la fois de la nature possible et des conséquences d'un réchauffement de la planète, est venue en 1979, sous la forme du rapport collectif présenté à l'Académie des Sciences Américaine par le très respecté Jule Charney, Professeur à UC-Los Angeles, puis à Princeton et au MIT [National Research Council, 1979]. Les deux modèles numériques disponibles conduisaient à inscrire le réchauffement associé à un doublement du CO<sub>2</sub> atmosphérique dans une fourchette allant de 1,5 °C à 4,5 °C. Ce dernier chiffre était particulièrement inquiétant, puisqu'il correspond à l'amplitude de température qui sépare les âges glaciaires et interglaciaires pendant la période quaternaire, depuis près d'un million d'années.

Ces résultats n'ont pas non plus été immédiatement acceptés. L'usage de modèles pour anticiper l'évolution future du climat a constamment posé des problèmes conceptuels difficiles à appréhender en dehors du champ des spécialistes. Il s'agit, en fait, de créer une nouvelle planète, une planète numérique, qui fonctionne de manière suffisamment similaire à la planète réelle pour servir de référence. Elle s'appuie en premier lieu sur des lois physiques qui gèrent les différentes formes de l'énergie, les différents réservoirs d'eau, les mouvements de l'air ou de l'océan, les effets de la rotation de la Terre, autour du soleil ou sur elle-même — des lois univer-

selles, qui resteront inchangées en cas d'augmentation des gaz à effet de serre, mais conduiront à des résultats différents. Cette définition des modèles climatiques est très proche de celle que l'on retrouve en météorologie, mais elle est très différente des pratiques propres à d'autres disciplines scientifiques, en particulier celles qui traitent du monde du vivant et n'ont pas de point d'appui sur des lois fondamentales qui soient similaires. C'est un point important : la notion de risque se définit de manière nécessairement différente d'une communauté scientifique à une autre (Balaji, 2020, ce volume, qui évoque aussi les débuts de la modélisation climatique).

Mais malgré ces difficultés, les premiers travaux présentés dans le rapport Charney, prenant essentiellement en compte le rôle de l'atmosphère, ont suscité une réponse extrêmement rapide de la communauté scientifique, comme de celle des décideurs politiques : création en 1980 du Programme Mondial de Recherche sur le Climat, sous la double tutelle du Conseil International des Sciences et de l'Organisation Météorologique Mondiale, création du GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental d'Experts sur l'Evolution du Climat) en 1988, mise en place du Sommet de la Terre de Rio en 1992, conduisant à définir la « La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques » (noté parfois CCNUCC par la suite). Celle-ci a été articulée autour de trois principes : principe de précaution, principe des responsabilités communes mais différenciées, principe du droit au développement.

Pour mesurer la vitesse de cette réaction collective, il est intéressant de comparer les résultats du sommet de Rio en 1992, fortement consacré au changement climatique, avec ceux du sommet de Stockholm en 1972. Le sommet de Stockholm a été extrêmement riche en réflexions sur des thèmes tels que le développement économique et social, la lutte contre la pauvreté, l'évolution de la démographie, la préservation des ressources... Les conclusions de ce sommet s'articulaient autour de 26 principes dont aucun ne faisait appel au mot « climat ». L'enjeu climatique est donc venu s'ajouter en très peu de temps à des enjeux plus anciens, et ceci en s'appuyant sur une culture et des outils qui sont avant tout ceux des sciences physiques ou chimiques.

## 1.2. *Le changement climatique : des visions culturelles très différentes*

L'entrée en vigueur de la Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (le CCNUCC), en 1994, marque les débuts d'une série d'actions qui n'ont toujours pas réussi à provoquer une diminution du rythme de croissance des émissions de gaz à effet de serre. Il n'est pas question dans ce texte, de reprendre l'historique de ces 26 années. Elles ont connu des succès (en particulier, mais pas seulement, l'accord de Paris!) et il existe des points communs aux différents échecs : ce sont les divergences entre Etats. Nous nous contenterons ici de quelques remarques simples sur les conséquences de ces échecs. Le but est de rappeler que la succession de ces échecs modifie le problème posé. Il est impossible aujourd'hui de dire si le problème climatique aurait pu être résolu dans les années 70 comme un problème énergétique. Mais il est, par contre, certain qu'aujourd'hui (peut-être comme hier) il ne peut être résolu que comme un problème à la fois énergétique, physique, géochimique, écologique, social, et politique.

Ceci ne fait pas disparaître la raison qui a fait de l'articulation « climat-énergie » le moteur des réflexions nombreuses, qui ont dominé le paysage politique et médiatique jusqu'à maintenant : 80% environ de l'énergie produite aujourd'hui est liée à l'utilisation des combustibles fossiles, qui représentent eux-mêmes plus de la moitié des gaz à effet de serre. Si l'on veut maîtriser le réchauffement, il faut donc trouver un remplacement à terme des combustibles fossiles par d'autres formes d'énergie. Mais les conditions pour y parvenir sont désormais très différentes. Les gaz à effet de serre principaux — les gaz à longue durée de vie — ont, comme leur nom l'indique, un temps de résidence atmosphérique très long, souvent caractérisé par une « demi-vie », difficile à estimer sous forme d'un chiffre simple, mais supérieur à 100 ans pour le CO<sub>2</sub> ou le protoxyde d'azote, et de l'ordre de 12 ans pour le méthane. Tous ces gaz restent donc longtemps dans l'atmosphère où ils se mélangent et s'accumulent. Ceci a deux conséquences majeures, souvent mal comprises. D'abord, les gaz à effet de serre qui circulent au-dessus de nos têtes viennent de tous les pays du monde, avec une proportion qui respecte à peu près celle de leurs émissions. Nous sommes donc exposés avant tout, sur nos

territoires, à des gaz émis aux Etats-Unis ou en Chine — et nos émissions affectent en retour ces mêmes pays. Nous sommes, par ailleurs, confrontés à une situation largement irréversible : plus on attend pour agir, plus le cumul des émissions augmentera le niveau de réchauffement auquel il sera éventuellement possible de stabiliser le climat de la planète.

Cela conduit à une deuxième série de réflexions. Nous ne maîtrisons pas les enjeux climatiques : ils dépendent d'un contexte international qui n'est régulé par aucun gouvernement mondial, et aussi d'une situation déjà très engagée par des décennies d'émissions de gaz à effet de serre. Bien sûr, l'importance que nous devons accorder, chacun, partout sur la planète, à la réduction de nos émissions de gaz à effet de serre, demeure — elle est même renforcée par ce constat. Mais cela signifie néanmoins que nous aurons peut-être à arbitrer des choix difficiles. La Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (le CCNUCC) a mis sur un pied d'égalité le développement des pays émergents, et la réduction du danger climatique. Mais que se passe-t-il s'il existe des contradictions dans la poursuite de ces deux enjeux? Quel statut doit-on donner par ailleurs au maintien de la biodiversité? Ou aux risques de pollution grave et prolongée de notre environnement? Doit-on laisser croître la démographie planétaire, ou faut-il essayer de la gérer? Quelle place doit-on donner à d'autres valeurs fondamentales : celles de la démocratie et des droits de l'homme? Il existe ainsi un large ensemble de priorités qui deviennent de plus en plus difficiles à arbitrer, au fur et à mesure que le cumul de nos émissions de gaz à effet de serre referme peu à peu le champ de ce qu'il est encore possible de faire physiquement, parce qu'elles relèvent de champs scientifiques et de systèmes de valeurs très différents les uns des autres.

Le rapport du GIEC destiné à évaluer les conditions permettant de rester sous la barre des 1,5 degrés de réchauffement (par rapport à la période pré-industrielle) est de ce point de vue un document fondamental qui illustre ces difficultés de manière très concrète (voir Masson-Delmotte [2020] dans ce volume). Il est issu d'une demande formulée par le CCNUCC dans le cadre de l'accord de Paris, réclamant d'évaluer les scénarios qui sont encore possibles pour respecter cette limitation du réchauffement à 1,5 degrés. C'est un objectif très ambitieux, sachant que des décennies d'émissions de gaz à effet

de serre nous ont déjà amenés à 1 degré de réchauffement. Ces scénarios du possible répondent aussi à une préoccupation indiscutablement légitime : faire droit à la réalité de menaces environnementales de court terme, affectant une large variété de zones vulnérables à la surface du globe. Ils ont été étudiés avec un soin remarquable, par un panel pluridisciplinaire d'experts issus des trois groupes du GIEC.

Mais que veut dire le mot « possible » dans ce contexte? Les scénarios du possible qui sont proposés à la réflexion des décideurs s'appuient en premier lieu sur l'idée d'un développement sobre qui fera peut-être consensus. Mais pour atteindre la neutralité carbone dans un délai compatible avec un maintien du réchauffement sous les 1,5 degrés, ils ont aussi besoin de s'appuyer sur une gamme de méthodes et solutions beaucoup plus large : par exemple sur l'énergie nucléaire, sur des énergies renouvelables qui peuvent prendre des formes variées (par exemple la production massive d'agro-carburants) ou encore sur une capacité à créer des puits de carbone, dont la faisabilité n'est pas encore prouvée (voir par exemple Czernichowski-Lauriol (2020, ce volume). La faisabilité et/ou la dangerosité de ces méthodes font encore l'objet de débats techniques ou éthiques. Mais, dans tous les cas, l'enjeu est énorme. La neutralité carbone devrait être atteinte en 2050, selon le rapport du GIEC : 28 ans, pour accomplir, à l'échelle mondiale, un remplacement complet des énergies fossiles. Il s'agit d'une révolution qui n'a probablement eu aucun équivalent dans l'histoire du monde. Elle n'est envisageable que dans un monde solidaire et sans conflits. Ce monde est le seul que le GIEC puisse envisager dans le cadre très strictement défini qui donne toute sa valeur à sa mission. Mais comment peut-on se servir d'une réflexion aussi contrainte pour établir des choix de priorité, qui peuvent aussi correspondre à différents choix de société?

Il faut, dans tous les cas, être vigilant car ces scénarios peuvent aussi conduire à la recherche de solutions dangereuses. Au nom d'un impératif climatique absolu, qui ne serait contredit par aucune autre contrainte, aucune autre valeur, il peut être tentant d'avoir recours à des solutions exceptionnelles, dont on sait qu'elles sont peut-être possibles mais certainement dangereuses : par exemple, un refroidissement artificiel de la planète provoqué par l'épandage de sulfates dans la stratosphère pour réfléchir le

rayonnement solaire incident et réduire ainsi son intensité sur la planète.

Des seuils importants ont été dépassés, tout n'est plus possible et les arbitrages nécessaires sont difficiles à mettre en place. À l'échelle mondiale, les transitions souhaitées par l'Accord de Paris ont peu de chance de se produire selon le calendrier et avec les résultats espérés, ne serait-ce que parce que les promesses des États sur lesquelles elles reposent sont loin d'être suffisantes et loin d'être tenues. Nous n'échapperons pas à la nécessité de définir plus clairement les valeurs qui motivent nos choix.

## 2. Les territoires : des lieux de prise de conscience

Les manifestations toujours plus visibles du changement climatique impliquent de reconsidérer la manière avec laquelle les territoires peuvent s'y adapter, en France comme ailleurs. La protection de ces territoires doit prendre en compte le risque d'un échec, au moins partiel, des politiques climatiques, aux niveaux international, européen ou national. Cette nécessité correspond à une inquiétude qui s'est d'abord développée dans des pays ou des régions fortement vulnérables : des îles menacées de submersion, des régions agricoles soumises à des sécheresses durables, par exemple dans la zone intertropicale... Nous le traiterons ici sous un angle un peu particulier, en nous appuyant sur un travail réalisé en Aquitaine, puis en Nouvelle-Aquitaine, pour mesurer de manière un peu plus précise ce que peut être l'apport d'une démarche régionale vis-à-vis des politiques nationales. C'est une mission qui nous a été donnée par la Région Aquitaine en 2011. Elle a été prolongée en 2016 dans le cadre de la Nouvelle-Aquitaine, en formant un groupe de réflexion plus structuré d'une vingtaine d'experts qui a pris le nom d'AcclimaTerra [AcclimaTerra, Le Treut H. (dir), 2018].

Ce qu'a demandé la Région Aquitaine lorsqu'elle nous a contactés était très spécifique, très clair. Il s'agissait de développer une vision territoriale du problème climatique, qui puisse être utilisée de manière concrète, en insistant sur les risques et les dommages que pourrait subir la Région dans le futur, avec l'anticipation de situations nouvelles. Il s'agissait en quelque sorte de renverser l'injonction célèbre à « Penser Globalement pour Agir Localement », en se souciant beaucoup plus fortement de « Penser Localement ».

Curieusement, à l'échelle d'une région, il n'existait que peu ou pas d'exemples d'un travail similaire. Il s'agissait pourtant seulement d'une démarche simple consistant à inverser le regard porté sur le fait régional. L'organisation globale et planétaire du système climatique, le développement associé de modèles numériques travaillant à cette même échelle globale, ont conduit très souvent à évaluer le risque climatique sur un mode « descendant » : en définissant le ou les futurs possible(s) à l'échelle de la planète, puis en les « régionalisant » à l'échelle d'un domaine plus petit. Une approche communément utilisée a été de se donner des objectifs lointains (par exemple ne pas dépasser 1,5 ou 2 °C de réchauffement en moyenne globale à l'horizon 2100), et de mettre en place une forme de *retro-planning* vers le temps présent, qui permette de définir ce qu'il faut décider aujourd'hui pour ne pas dériver vers des futurs indésirables un siècle plus tard. Cette approche s'est cependant montrée très insuffisante pour aborder dans le détail la gestion d'un territoire nécessairement complexe face au changement climatique : il est difficile d'agréger dans une telle approche la nature multidisciplinaire des risques encourus.

L'un des mots clefs qui a guidé le travail a été celui de vulnérabilité. Il renvoie à tous les éléments de fragilité d'un territoire, dans des domaines variés. La manière d'opérer a été simple conceptuellement, mais plus complexe à mettre en œuvre. Il s'est agi, collectivement, de faire un recensement de l'ensemble des travaux existants porteurs d'informations sur le changement climatique en (Nouvelle) Aquitaine et de les ordonner pour faire apparaître les liens entre différentes problématiques : le littoral, la gestion de l'eau, la qualité de l'air ou des sols, les zones urbaines, l'agriculture, les massifs forestiers, les montagnes. Deux livres publiés ont accompagné ces travaux : l'un en 2013 [Le Treut, 2013], consacré à l'Aquitaine, et l'autre en 2018 s'appliquant à la Nouvelle-Aquitaine [AcclimaTerra, Le Treut H. (dir), 2018]. Ce passage de l'Aquitaine à un territoire beaucoup plus grand a donné une ampleur différente au projet : son organisation a été précisée, et lui a apporté un nom nouveau : « AcclimaTerra ».

La plus grande surprise qui a accompagné notre travail a peut-être été l'ampleur et la densité de l'information disponible en région Aquitaine ou Nouvelle-Aquitaine. Au total, près de 400 chercheurs ont contribué aux deux volumes qui ont été pu-



bliés, la plupart d'entre eux étant des chercheurs travaillant dans la région. Au fil des années, la valorisation de ce travail a pris une forme un peu spécifique qui a été d'aller à la rencontre des acteurs de la Nouvelle-Aquitaine. Dans un premier temps, une vingtaine de villes ont été ciblées : AcclimaTerra y a passé chaque fois trois jours, pour des contacts avec les élus, les entrepreneurs, les associations, le grand public, les scolaires. Cette série d'opérations a eu pour but de présenter le travail d'AcclimaTerra, mais aussi d'être à l'écoute des personnes rencontrées, elle a été répétée ensuite dans une vingtaine d'autres villes. Elle s'est accompagnée d'opérations plus ciblées, d'aides à la mise en place des plans-climat-air-énergie territoriaux (PCAET), d'actions répétées de médiation dans un large ensemble de domaines — avec, par exemple, un projet « Acclimacampus » sur l'université de Bordeaux. De manière générale, ces activités ont aussi témoigné de l'importance de la dimension territoriale et montré que la compréhension des enjeux environnementaux était très fortement renforcée par l'attachement de chacun à sa région.

Une autre prise de conscience, a été celle de la dimension systémique du fait régional. Bien sûr la Région n'est pas autonome : son évolution climatique dépend de facteurs de grande échelle. Le réchauffement déjà sensible aujourd'hui en région Nouvelle-Aquitaine (1,5 °C environ par rapport à la période préindustrielle) est caractéristique d'une grande partie de l'Europe. Mais il s'accompagne de phénomènes plus locaux : la croissance du nombre de sécheresses agricoles, par exemple. La ressource en eau constitue sans aucun doute l'un des éléments les plus sensibles de la gestion régionale, et a été largement commentée dans le rapport AcclimaTerra. Elle est tributaire d'une grande variété de processus. On ne peut l'évoquer sans citer à la fois l'enneigement des montagnes, les ressources hydroélectriques, le refroidissement des centrales nucléaires, le bouchon vaseux de l'estuaire girondin, les filières agricoles, la forêt, la vigne... Cette complexité n'est, par ailleurs, gérable que dans le respect d'un contexte écologique, humain, économique. Et ce contexte large définit à son tour un système climatique régional dont la complexité est, sans doute, égale à celle du système climatique global. Le domaine régional qui est celui du découpage territorial français tire son importance de cette double qualité : être proche des citoyens,

mais pouvoir aborder les problématiques difficiles et souvent contradictoires entre lesquelles il faut et faudra arbitrer.

Un mot clef du projet AcclimaTerra a donc aussi été celui de multidisciplinarité. Il s'est agi d'aborder le problème climatique régional dans sa dimension systémique, de la manière la plus large possible, en s'appuyant sur une accréation progressive de compétences très diverses. L'ambition du travail a été d'ordonner ces travaux pour faire apparaître les liens entre des problématiques et des disciplines scientifiques souvent indissociables mais demandant des compétences très différentes : les aspects climatiques, l'histoire courte et ancienne des territoires, le littoral, la gestion de l'eau, la qualité de l'air ou des sols, les zones urbaines, l'agriculture, les massifs forestiers, les montagnes, les zones humides, la biodiversité, la santé, le rôle du droit et de la gouvernance, les énergies locales, les aspects sociaux... Le groupe initial s'est progressivement organisé, pour essayer de se mettre à la hauteur de ces enjeux. D'abord, sous forme d'un bureau qui continue de gérer les sollicitations nombreuses des acteurs de la région. Ensuite, grâce au rôle du conseil scientifique qui a été un lieu d'animation et de réflexion majeur, où se sont construits les « groupes d'écriture » des rapports et les activités de médiations. Il ne s'agit toutefois pas d'une construction stabilisée. Elle reste fragile, avec un statut qui a changé. AcclimaTerra était initialement un groupe d'experts de la Région ; c'est devenu une association, que la Région continue de soutenir, en particulier via le travail d'une ou deux chargées de mission.

Le site Web « Acclimaterra.fr » a voulu remercier toutes les personnes qui ont participé à ce travail. Il est impossible de le reproduire ici mais nous pouvons au moins citer les participants aux bureaux successifs (Francis Grousset, Antoine Kremer, Denis Salles et Eric Villenave, puis Nathalie Caill-Milly, Daniel Compagnon, Alain Dupuy, et Benoît Sautour) et les chargées de mission (Emilie Bourdens, Yohana Cabaret, Camille Jonchères, Clémence Marcher), en insistant sur le rôle de tous, ainsi que celui de la Région et de ses services.

### 3. Conclusion : du diagnostic à l'action ?

Le travail d'AcclimaTerra a été avant tout un travail documentaire, de partage d'information. Il suscite

une question récurrente : quelle est l'utilité du travail accompli ? Conduit-il à des résultats concrets ?

Un élément de réponse tient dans la liste des thèmes abordés dans les deux rapports, cités plus haut, et dans toutes les formes de médiation qui les ont accompagnés. Chacun de ces thèmes a été étudié de manière approfondie par un groupe d'une dizaine de chercheurs, parfois plus, en s'en tenant toujours au même enjeu, celui des changements climatiques à venir et de la manière de les anticiper. Le travail accompli est donc nécessairement porteur de suggestions, voire de recommandations, qu'elles soient directes ou indirectes. Nous avons pu constater que la parole d'AcclimaTerra était généralement accueillie avec intérêt, dans les lieux d'expression publique, comme auprès d'élus ou de professionnels. Il s'agit donc d'un travail qui a un intérêt et un impact en lui-même.

Mais il est aussi important, très important, de comprendre quels sont les écueils qui peuvent empêcher le diagnostic scientifique de contribuer à la prise de décision — une situation qui est apparue fréquente dans nos analyses. Dans un cadre démocratique, cette décision revient aux élus, elle fait l'objet de votes (en l'occurrence dans les assemblées régionales) et la compatibilité, l'intercompréhension des réflexions sont essentielles. Il s'agit (et il n'y a là rien de nouveau) de minimiser l'espace qui sépare le domaine des experts de celui des élus, pour leur permettre de travailler dans un cadre qui respecte pour chacun leurs missions, leurs règles de fonctionnement et leur éthique. Dans un cadre régional, toutefois, cette approche prend facilement une dimension plus concrète, plus opérationnelle, du fait de la proximité entre les différents acteurs.

La Nouvelle-Aquitaine a eu une initiative assez particulière, à ce sujet, parce qu'elle cible très fortement le partenariat avec le monde académique. Elle a créé « NéoTerra », un projet porté par la Région, qui s'appuie sur AcclimaTerra et sur un groupe parallèle concernant la biodiversité (Ecobiose). NéoTerra permet une forme d'échange cadrée entre scientifiques et décideurs, et donc d'envisager des partenariats permettant de mieux étudier le caractère systémique des changements à venir.

La dimension régionale joue là un rôle qui a été finalement très peu étudié. Il est pourtant nécessaire parce que les changements climatiques en cours sont trop avancés désormais pour que l'on ne prenne pas

en compte, dans leur étude, la multiplication inévitable des solutions et des initiatives qui peuvent être contraires les unes avec les autres. La vision commune qui oppose adaptation et atténuation du changement climatique est de ce point de vue très limitative. Il est devenu nécessaire aujourd'hui de concilier deux enjeux qui ne s'opposent pas, mais qui ne se rejoindront peut-être pas de manière spontanée : participer sans faiblesse à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, et protéger les territoires de risques croissants et largement irrémédiables que les modèles savent désormais très bien encadrer, comme l'ont montré, par exemple, les résultats publiés par le GIEG en 2001, qui ont anticipé de manière très correcte l'évolution des températures entre 2000 et 2020 (voir Masson-Delmotte, 2020).

Cette conciliation est possible : dans un monde où des facteurs importants d'émissions de gaz à effet de serre sont liés au transport, à l'habitat et à l'agriculture, il faut tirer parti de ce que sont déjà les territoires : des lieux où les problèmes posés s'appellent urbanisme, évolution des filières agricoles, infrastructures de transport, défense des zones naturelles et des zones vulnérables, développement de filières énergétiques locales, qualité de l'air, de l'eau et des sols, soutien à l'organisation de la pêche... Plus qu'une adaptation (le mot a une consonance un peu passive), c'est un changement actif, un changement majeur en termes de prise de conscience, mais aussi de développement scientifique et socio-économique qui devient nécessaire.

Il appelle aussi à une évolution de la recherche. L'aspect systémique des changements régionaux reste mal défini. Par exemple, face à l'augmentation des sécheresses agricoles en Aquitaine déjà notée, qui est en mesure de définir précisément leur impact à venir sur la faune, la flore, en fonction des saisons ? Il existe une information très importante sur chacun de ces sujets mais elle n'est pas fortement utilisée. Cela vaut aussi pour des méthodes de recherches qui restent un peu oubliées, comme par exemple l'outil satellitaire, encore fortement absent dans les études régionales. La nécessité de comprendre ce qui cause ces manques d'intérêt est particulièrement importante, parce que les financements nécessaires à la protection préventive et au développement des régions ne seront mobilisables que s'il existe une capacité de justifier objectivement

ce qui peut être apporté en termes de bilans carbone et financier.

Bien sûr, il ne faut, en aucun cas, voir dans ces approches une forme de repli identitaire. Cette science qui doit être partagée entre des disciplines scientifiques qui ont chacune leur histoire, doit aussi l'être entre des territoires très différents mais confrontés à des enjeux similaires ... ou parfois opposés.

## References

- AcclimaTerra, Le Treut H. (dir) (2018). *Anticiper les changements climatiques en Nouvelle-Aquitaine. Pour agir dans les territoires*. Éditions Région Nouvelle-Aquitaine.
- Balaji, V. (2020). Science des données versus science physique : la technologie des données nous conduit-elle vers une nouvelle synthèse? *C. R. Géosci.*, 352(4-5) :297–308.
- Czernichowski-Lauriol, I. (2020). Captage et Stockage du CO<sub>2</sub> : le puits de carbone géologique. *C. R. Géosci.*, 352(4-5) :383–399.
- Le Treut, H. (2013). *Les impacts du changement climatique en Aquitaine : un état des lieux scientifique*. Presses universitaires de Bordeaux, Pessac. LGPA-Editions, (Dynamiques environnementales, HS, 2013).
- Le Treut, H., Somerville, R., Cubasch, U., Ding, Y., Mauritzen, C., Mokssit, A., Peterson, T., and Prather, M. (2007). Historical overview of climate change. In Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L., editors, *Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Masson-Delmotte, V. (2020). Réchauffement climatique : état des connaissances scientifiques, enjeux, risques et options d'action. *C. R. Géosci.*, 352(4-5) :251–277.
- National Research Council (1979). *Carbon Dioxide and Climate : A Scientific Assessment*. The National Academies Press, Washington, DC.
- Peterson, T. C., Connolley, W. M., and Fleck, J. (2008). The myth of the 1970s global cooling scientific consensus. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 89 :1325–1337.
- Revelle, R. and Suess, H. (1957). Carbon dioxide exchange between atmosphere and ocean and the question of an increase of atmospheric CO<sub>2</sub> during the past decades. *Tellus*, 9 :18–27.





---

Facing climate change, the range of possibilities / *Face au changement climatique, le champ des possibles*

# Changement climatique et biosphère

## *Climate change and the biosphere*

Isabelle Chuine<sup>a</sup>

<sup>a</sup>CEFE, Université de Montpellier, CNRS, Univ Paul Valéry Montpellier 3, EPHE, IRD, Montpellier, France

Courriel : [isabelle.chuine@cefe.cnrs.fr](mailto:isabelle.chuine@cefe.cnrs.fr)

**Résumé.** Le changement climatique est devenu la troisième cause de perte de biodiversité derrière l'exploitation des milieux naturels par l'homme et les prélèvements directs (alimentation, santé, matières premières). Il pourrait devenir la première cause de perte de biodiversité d'ici le siècle prochain. Le changement climatique a modifié les rythmes biologiques et les aires de répartition des espèces, le fonctionnement des écosystèmes, les chaînes trophiques, les cycles biogéochimiques, et les services écosystémiques. Les projections que nous sommes capables de fournir de l'évolution future de la biosphère montrent une amplification des phénomènes observés depuis cinquante ans. Les moyens d'adaptation du vivant sont très limités étant donné la vitesse à laquelle se produit le changement climatique. C'est pourquoi, il est nécessaire, au-delà de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, de réduire également les autres pressions anthropiques sur la biosphère.

**Abstract.** Climate change has become the third cause of biodiversity loss behind the exploitation of natural environments by humans and direct exploitation (food, health, raw materials). It could become the primary cause of biodiversity loss by the next century. Climate change has modified the biological rhythms and distributions of species, the functioning of ecosystems, trophic chains, biogeochemical cycles, and ecosystem services. The projections that we are able to provide of the future evolution of the biosphere show an amplification of the phenomena observed the last fifty years. Species have very limited ways to adapt given the speed at which climate change occurs. This is why, beyond reducing greenhouse gas emissions, it is also necessary to reduce the other anthropogenic pressures on the biosphere.

**Mots-clés.** Biodiversité, Aire de répartition, Événements extrêmes, Extinctions, Rythmes biologiques, Fonctionnement des écosystèmes.

Available online 25th November 2020

### 1. Les services rendus à l'homme par la biosphère se dégradent car elle perd sa biodiversité

J'ai tenu pour cet article à utiliser le terme de biosphère plutôt que celui de biodiversité ou d'écosphère pour les raisons suivantes : le terme de biosphère, introduit pour la première fois par le géo-

logue Eduard Suess en 1885 [Suess, 1885], représente l'ensemble des organismes vivants et les milieux dans lesquels ils vivent. Il renferme donc à la fois la notion de biodiversité qui représente la diversité des organismes vivants, incluant sa diversité taxonomique et sa diversité génétique ; et celle d'écosystème qui représente un ensemble formé par une communauté d'êtres vivants qui interagissent entre eux et

avec leur environnement. Les termes d'écosystème et de biodiversité sont apparus des décennies plus tard (1935 et 1986 respectivement) et ont progressivement supplanté celui de biosphère, sans doute par commodité dans les débats publics, permettant de discuter de façon plus précise des différents enjeux environnementaux auxquels l'homme était confronté (services écosystémiques, espèces menacées, ressources génétiques, etc...). L'équivalent du GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat) pour la biosphère est d'ailleurs intitulé Plate-forme Intergouvernementale pour la Biodiversité et les Services Ecosystémiques (IPBES, *Intergovernmental Science-Policy Platform for Biodiversity and Ecosystem services*). La plupart des exemples que je citerai dans cet article concerneront le milieu terrestre. Pour un état des lieux plus spécifique au milieu marin, voir par exemple Gattuso et al. [2018], Hoegh-Guldberg and Bruno [2010].

La biosphère rend un nombre très important de services à l'homme que l'on pourrait qualifier de vitaux tant sa santé, son alimentation et son bien-être en dépendent. On distingue généralement quatre grands types de services rendus à l'homme par la biosphère : les services d'approvisionnement (alimentation, eau, matière première, énergie), les services de régulation (qualité de l'air, fertilité des sols, contrôle des inondations et des épidémies, etc...), les services culturels (identités culturelles, valeurs esthétiques et spirituelles, source d'inspiration artistique et scientifique), et les services de soutien qui sont le fondement de tous les écosystèmes et de leurs services (habitats favorables pour les espèces animales et végétales participant aux services écosystémiques et préservation de leur diversité).

La plupart des services rendus à l'homme par la biosphère n'ont fait que se détériorer au cours des cinquante dernières années, et en particulier les services de pollinisation, de ressources génétiques, de régulation des maladies vectorielles, et de fertilité des sols [Díaz et al., 2019]. La détérioration de ces services est en très grande partie due au fait que la biosphère perd sa biodiversité, en termes de nombre d'espèces et d'écosystèmes, et de diversité génétique [Díaz et al., 2019, Oliver et al., 2015a]. Le taux d'extinction des espèces est actuellement au moins dix fois supérieur à ce qu'il a été au cours des dix derniers millions d'années et il ne fait qu'augmenter [Díaz et al., 2019]. Cette perte de diversité touche aussi bien

les espèces sauvages que domestiquées par l'homme [Díaz et al., 2019, Bélanger and Pilling, 2019]. Ce déclin rapide de la biodiversité signifie que la plupart des objectifs des accords internationaux en matière d'environnement et de bien-être des populations humaines (Objectifs d'Aïchi de la Convention sur la Biodiversité, Objectifs de développement durable 2030 des Nations Unies) ne seront pas atteints sur la base des trajectoires actuelles [Díaz et al., 2019]. Ce déclin portera également atteinte aux objectifs spécifiques dans l'Accord de Paris adopté lors de la COP21 (21<sup>e</sup> Conférence des Parties de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques).

## 2. Le changement climatique est actuellement la troisième cause de perte de biodiversité

Les causes premières de pertes de biodiversité sont actuellement la destruction des habitats naturels par les activités humaines, les prélèvements directs pour l'alimentation, la santé et la création de biens matériels, et le changement climatique qui se loge à la troisième place devant la pollution et les invasions biologiques [Díaz et al., 2019]. Le changement climatique exacerbe actuellement les effets des autres pressions exercées par l'homme sur la biosphère et il est devenu la cause majeure des changements observés sur la biosphère au cours des dernières décennies [Field et al., 2014]. Ces changements sont principalement une modification des cycles de développement des êtres vivants, qui a des conséquences majeures sur leur croissance, leur survie et leur reproduction, une modification des aires de répartition géographique des espèces, et une modification des échanges de flux d'eau, de gaz et d'énergie entre la biosphère et l'atmosphère [Pecl et al., 2017].

Le changement climatique modifie le déroulement du cycle annuel de développement des espèces végétales mais aussi animales, et notamment celui des animaux dits « poïkilothermes » qui ne régulent pas leur température corporelle (par exemple reptiles, amphibiens, poissons, insectes, crustacés, mollusques) [Cleland et al., 2007, Menzel, 2003, Parmesan and Yohe, 2003]. Les dates d'apparition, au cours de l'année, des différents événements qui rythment le cycle annuel de développement de ces espèces, comme par exemple l'apparition des nouvelles feuilles ou des fleurs chez les plantes, l'éclosion des œufs, etc. sont très étroitement dépendantes des

conditions météorologiques qui ont prévalu plusieurs semaines voire plusieurs mois avant l'apparition de ces événements [Bronson, 2009, Chuine and Régnière, 2017]. Le réchauffement climatique a avancé la reprise d'activité des êtres vivants au printemps de l'ordre de deux à trois jours par décennie, et a retardé leur fin d'activité à l'automne de l'ordre de un à deux jours par décennie (Figure 1) [Menzel et al., 2006, Parmesan and Yohe, 2003, Walther et al., 2005]. Mais si les tendances observées étaient jusqu'ici linéaires, les études récentes montrent que depuis les années 1990s, les tendances à la précocité au printemps ont ralenti chez les plantes [Fu et al., 2015]. Ce ralentissement de la tendance à la précocité de la reprise d'activité des plantes au printemps serait dû au réchauffement de l'hiver [Asse et al., 2018], comme l'avaient prédit les modèles [Chuine et al., 2016, Morin et al., 2009, Vitasse et al., 2011] et les résultats expérimentaux [Morin et al., 2010]. En effet, les plantes pérennes ont besoin d'un certain nombre de jours de froid pendant l'hiver pour lever la dormance de leurs bourgeons et pour fleurir (initiation florale) [Anderson et al., 2010, Campoy et al., 2011]. Cette dormance hivernale, qui correspond à un état d'inactivité physiologique régulée par des facteurs internes, est une adaptation des plantes extratropicales pour survivre à la mauvaise saison (l'hiver sous nos latitudes) dont les conditions de températures ne sont pas compatibles avec l'activité cellulaire. C'est notamment grâce à cette adaptation que les plantes peuvent résister au gel pendant cette période. Si les conséquences de ce manque de froid hivernal sont pour le moment un ralentissement de la précocité printanière, les modèles prévoient que ce manque de froid provoquera d'ici quelques années un retard dans la reprise d'activité de la végétation puis dans quelques décennies une impossibilité à reprendre cette activité normalement [Chuine et al., 2016].

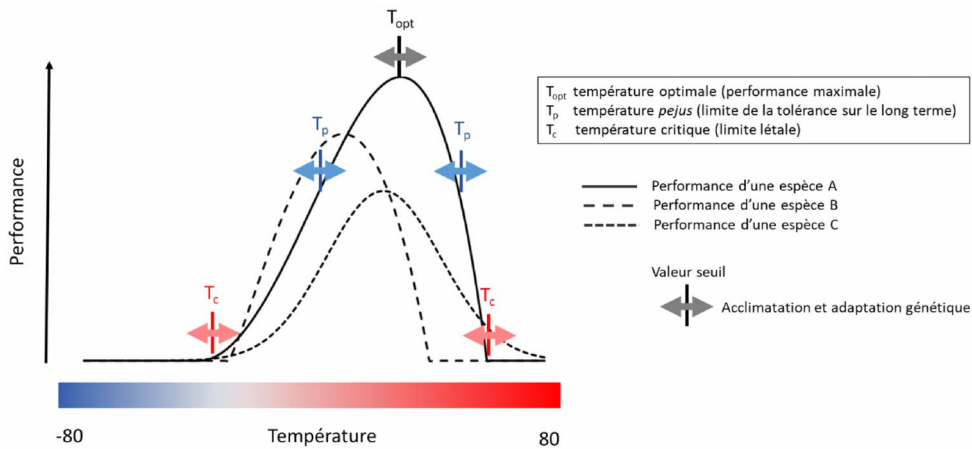
Ces modifications du cycle annuel de développement des êtres vivants ont de nombreuses conséquences en cascades, certaines positives mais beaucoup négatives. Chez les plantes pérennes, ces modifications se traduisent par un allongement de la période de croissance [Menzel and Fabian, 1999], en partie responsable de l'augmentation de la productivité des forêts jusqu'au début des années 2000 [Delpierre et al., 2009, Myneni et al., 1997, Piao et al., 2007]. En revanche, chez les plantes annuelles, le cycle annuel de croissance est raccourci car le dé-

veloppement est accéléré. Ce raccourcissement du cycle chez les annuelles engendre une baisse de la quantité de fleurs et de graines produites, et ce même quand les conditions d'alimentation en eau sont optimales, car celle-ci dépend en général de la croissance qui a pu être effectuée avant la mise à fleur [Asseng et al., 2011, Ferris et al., 1998, Wardlaw and Wrigley, 1994, Wheeler et al., 1996]. Les modifications du cycle annuel de développement des êtres vivants ont également d'autres conséquences telles qu'une augmentation des dommages de gels tardifs car la végétation démarre sa croissance avant l'arrivée des derniers gels de printemps (Figure 1) [Lenz et al., 2013, Vitasse et al., 2018], ce qui a engendré ces dernières années des pertes de récolte importantes pour les viticulteurs et arboriculteurs fruitiers. L'allongement de la période d'activité a également pour conséquence une augmentation du stress hydrique, car la végétation épuise les réserves en eau du sol plus rapidement, puisqu'elle commence à puiser l'eau plus tôt et elle puise plus longtemps (pour les espèces pérennes, notamment les arbres) (Figure 1) [Carnicer et al., 2011, Jump et al., 2017]. Ce phénomène vient s'ajouter dans certaines régions à des sécheresses estivales accrues et répétées, du fait d'une baisse des précipitations et de l'augmentation de l'évapotranspiration due à l'augmentation de température [IPCC, 2013, Sheffield et al., 2012].

Ces modifications dans les cycles de développement des organismes vivants impactent également les interactions entre espèces, notamment au sein des chaînes trophiques (chaînes alimentaires) dans lesquelles les relations de type proie-prédateur, hôte-parasite, plante-pollinisateur, ou encore plante-herbivore sont déterminées par le stade de développement de chacune des espèces en interaction (voir pour revue Renner and Zohner, 2018). Par exemple, le stade chenille d'une espèce de papillon qui se nourrit exclusivement de jeunes feuilles, devra être parfaitement synchrone avec le stade jeune feuille pour la survie de cette espèce de papillon (Figure 1). Or, les cycles de développement ne sont pas modifiés de la même façon chez les différentes espèces car celles-ci ne sont pas sensibles de la même façon à la température (Figure 2). Les cycles se désynchronisent et les chaînes alimentaires se rompent [Renner and Zohner, 2018]. En conséquence, au-delà d'une modification des réseaux d'interactions trophiques [Gilman et al., 2010, Walther, 2010], ces







**FIGURE 2.** Variation des performances des espèces selon la température. La performance représente ici aussi bien celle d'un processus physiologique, que la croissance, la survie ou la fécondité d'une espèce. Les courbes de performance peuvent revêtir des formes variées mais présentent toutes un optimum thermique, et décroissent fortement quand la température est trop basse ou trop élevée. L'optimum thermique est généralement variable entre espèces, entre individus d'une même espèce et aussi entre processus physiologiques. Les courbes de réponse à la température peuvent généralement varier dans une certaine mesure à très court terme grâce aux processus d'acclimation chez un même génotype/individu, et à plus long terme grâce à l'adaptation génétique chez une espèce/population. Les êtres vivants peuvent supporter de sortir de leur zone thermique optimale mais pour un temps d'autant plus limité qu'ils sont loin de l'optimum. D'après la figure TS 3.A du rapport du WG 2 de l'IPCC, 2014.

de leurs graines qui déterminent leurs agents de dispersion (gravité, vent, eau, animaux). En comparaison, les grands mammifères, les insectes ailés et les organismes marins pélagiques peuvent migrer de plusieurs centaines, voire milliers de kilomètres par décennie. Ces changements de répartitions géographiques se traduisent également par des extinctions locales d'espèces dans les marges chaudes des aires de répartition de nombreuses espèces [Parmesan and Yohe, 2003, Walther, 2003]. Les espèces qui vivent dans des espaces limités aux régions polaires et aux étages subalpins se retrouvent particulièrement vulnérables, car leur habitat rétrécit inexorablement [Callaghan et al., 2004, Engler et al., 2011], de même que les espèces endémiques qui ont des aires de répartition très restreintes [Dirnböck et al., 2011, Malcolm et al., 2006].

L'une des raisons fondamentales à tous ces effets du changement climatique sur les êtres vivants est que leur activité physiologique ne peut avoir lieu que dans une gamme de températures assez restreinte, d'à peine quelques dizaines de degrés (Figure 2). Les performances des organismes vivants

sont nulles quand la température devient trop basse ou trop élevée et elles sont optimales à un niveau de température intermédiaire. Bien que l'on ne sache pas encore très bien expliquer pourquoi l'efficacité des processus biologiques à l'échelle de la cellule, de l'organe ou de l'organisme varie ainsi avec la température, l'effet de la température sur les structures moléculaires joue probablement un rôle important [Schulte, 2015]. En ce qui concerne le développement des plantes des milieux extratropicaux par exemple, nous savons que la plupart d'entre elles ont besoin de températures froides pour lever la dormance des graines et des bourgeons, et pour fleurir, signe que la mauvaise saison de l'hiver est passée, et que la croissance peut reprendre [Anderson et al., 2010, Campoy et al., 2011]. Nous savons aussi, qu'une fois cette dormance levée, plus il fait chaud plus la croissance cellulaire est rapide jusqu'à atteindre un optimum thermique qui peut varier entre 20 et 30 °C selon les espèces [Anderson et al., 2010]. Passé cet optimum, les performances de croissance diminuent même en conditions d'hydratation optimale jusqu'à atteindre un seuil ther-

mique létal au-delà duquel les protéines et acides nucléiques sont dénaturés et les membranes cellulaires désorganisées, causant des dommages cellulaires irréparables et la mort de l'organisme. Les animaux poïkilothermes (qui ne régulent pas leur température corporelle) dépendent également des conditions extérieures pour leur développement. Les vitesses de développement embryonnaire et larvaire dépendent de la température extérieure selon une relation présentant un optimum [Cossins and Bowler, 1987, Gillooly et al., 2002] (Figure 2). Chaque processus biologique dépendant de la température possède son propre optimum thermique qui varie entre espèces et entre individus d'une même espèce. L'agrégation de l'ensemble de ces processus permettant aux organismes de vivre et se reproduire se traduit par une relation des taux de survie et de fécondité à la température qui possède également un optimum thermique et qui varie entre espèces et entre individus.

Nous sommes actuellement très loin de connaître quels sont les optimums thermiques et les seuils thermiques létaux de toutes les espèces. Néanmoins, force est de constater que ces seuils thermiques létaux sont de plus en plus souvent atteints. Il apparaît par exemple que le fonctionnement de la végétation devient fortement compromis dans de nombreuses régions du globe à cause des canicules et sécheresses qui se répètent et battent régulièrement des records [Field et al., 2014]. Quand les conditions deviennent trop sèches et trop chaudes, la végétation va dans un premier temps passer de puits de carbone à source de carbone car elle va respirer davantage qu'elle ne photosynthétise [Bonan, 2008, Chapin et al., 2008]. Et si ces conditions deviennent trop fréquentes ou trop intenses, elle va dans un deuxième temps dépérir et mourir [Carnicer et al., 2011, Jump et al., 2017]. La disponibilité en eau est tout aussi cruciale au fonctionnement cellulaire, voire davantage, que les conditions de température. La croissance cellulaire nécessite chez les plantes un certain niveau d'hydratation des cellules et lors d'un épisode de sécheresse, c'est l'un des processus biologiques qui va s'arrêter en premier [Cosgrove, 1986, Lempereur et al., 2016]. Or la disponibilité en eau est elle aussi beaucoup affectée par le changement climatique, d'une part, parce que le régime de précipitation a changé dans de nombreuses régions (nette diminution dans le Sud de la France

par exemple); et d'autre part, parce que l'augmentation de la température augmente l'évaporation des sols et la transpiration de la végétation. Au-delà des problèmes de disponibilité en eau, la canicule de juin 2019 a révélé que, même en conditions hydriques non stressantes, des températures trop élevées pouvaient occasionner des dommages importants sur la végétation. Celle canicule a en effet occasionné des dommages sans précédent sur le feuillage de nombreuses espèces, y compris des espèces méditerranéennes particulièrement résistantes aux fortes chaleurs et à la sécheresse telles que le chêne vert (Figure 3). Bien que les causes de ces dommages n'aient pas encore été analysées, l'hypothèse avancée est qu'ils seraient dus à la précocité exceptionnelle de la canicule à laquelle les plantes n'étaient pas préparées, beaucoup d'entre elles n'ayant pas encore achevé la mise en place des différentes structures protectrices de leurs feuilles, telles que la cuticule.

### **3. Les effets du changement climatique sur la biosphère ont des conséquences sur le bien-être des populations humaines et leurs activités, les services écosystémiques, et le climat lui-même**

Au-delà des conséquences pour les espèces elles-mêmes, les effets du changement climatique sur la biosphère ont également des conséquences sur les services écosystémiques, sur le bien-être des populations humaines et sur le climat lui-même.

La biosphère subit les modifications de l'atmosphère mais celle-ci est également impactée en retour par la biosphère de nombreuses façons. La végétation terrestre est en effet une composante importante du système climatique [Chapin et al., 2008, Marland et al., 2003]. Elle échange avec l'atmosphère des flux d'énergie, d'eau et de gaz, principalement le dioxyde de carbone et l'oxygène [Bonan, 2008, Chapin et al., 2008]. Ces flux mettent en jeu de nombreux processus physiques, biochimiques et physiologiques avec des schémas de régulation et des boucles de rétroaction complexes. Toute modification de la végétation ou de son fonctionnement entraîne donc des modifications de ces flux qui affectent la température de surface, l'hygrométrie de



**FIGURE 3.** Photographies de feuilles de chênes verts au lendemain de la canicule du 29 juin 2019 sur le site expérimental du CNRS à Puéchabon (Hérault). Les feuilles ont blanchi en quelques heures avant de devenir brunes au bout de quelques jours. Le chêne vert est une espèce méditerranéenne adaptée aux canicules et sécheresses. Les dommages occasionnés par la canicule de juin 2019 sont inédits et sans doute dus à la précocité exceptionnelle de la canicule qui est arrivée avant que les feuilles aient achevé leur développement et notamment la mise en place des structures de protection telle que la cuticule. Photos : Jean-Marc Limousin and Jean-Marc Ourcival, CNRS.

l'air, l'albédo, mais aussi les stocks de carbone [Bonan, 2008, Chapin et al., 2008]. Par exemple, l'augmentation de l'abondance des ligneux dans la toundra de l'arctique à cause du changement climatique diminue l'albédo de surface, et, par voie de conséquence, le bilan radiatif de surface et donc à terme la température de surface, amplifiant ainsi le réchauffement déjà plus prononcé aux hautes latitudes [Chapin, 2005]. Cet effet d'amplification se rajoute à celui de la réduction de la surface neigeuse aux hautes latitudes qui diminue également l'albédo de surface.

Le réchauffement et l'augmentation de la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone provoquent une augmentation de l'activité photosynthétique des plantes qui consomme le dioxyde de carbone et produit de l'oxygène. Mais le réchauffement augmente aussi la respiration des plantes qui consomment donc davantage d'oxygène [Grace and Rayment, 2000, Ryan, 1991]. Le bilan net en carbone peut donc être très variable selon les régions en fonction des conditions climatiques. Il est positif dans les régions qui reçoivent encore suffisamment de précipitation, mais il devient de plus en plus souvent né-

gatif dans les régions soumises à des sécheresses de plus en plus longues et intenses [Allard et al., 2005]. Ceci est dû au fait que la plupart des plantes ne peuvent plus réaliser la photosynthèse quand elles manquent d'eau. En effet, la plante absorbe le dioxyde de carbone de l'air en ouvrant des structures appelées stomates, en général disposées sur la face inférieure des feuilles, mais lorsqu'ils sont ouverts, les stomates libèrent également de l'oxygène (produit par la photosynthèse) et de l'eau. Ces interactions complexes entre conditions climatiques et fonctionnement de la végétation sont extrêmement importantes à prendre en compte dans notre évaluation du rôle de la végétation, et notamment des forêts, dans l'atténuation du changement climatique [Richardson et al., 2010, Wood et al., 2012]. Ainsi, les effets du changement climatique sur le fonctionnement de la végétation ont des effets-retours à la fois positifs et négatifs sur le climat lui-même, et il est nécessaire d'avoir une connaissance complète des nombreuses interactions en jeu pour mettre en œuvre des solutions d'atténuation du changement climatique basées sur la nature.

Le changement climatique modifie profondément l'un des services écosystémiques les plus essentiels à l'homme qui est le service d'approvisionnement (en denrées alimentaires, matières premières, eau potable et médicaments). Cet effet s'opère au travers des changements de répartition géographique des espèces, en particulier des espèces marines (ressources halieutiques); mais aussi des performances des espèces, notamment exploitées par l'homme, en termes de croissance et reproduction, c'est-à-dire pour l'homme de productivité. L'impact du changement climatique sur les grandes cultures a été jusqu'ici plutôt négatif avec des baisses de rendements, notamment pour le blé, le riz et le maïs qui sont les trois plus importantes cultures dans le monde (<http://www.fao.org/>) [Field et al., 2014, Lobell et al., 2011, Schlenker and Roberts, 2009]. Ces baisses de rendement sont dues en partie à l'accélération et au raccourcissement du cycle annuel de développement évoqué précédemment. Dans ce cas précis des plantes cultivées (mais cela est aussi valable pour les animaux domestiqués), les pertes de diversité génétique dues à la réduction du nombre de variétés cultivées, pour ne garder que les plus productives et les plus intéressantes pour la commercialisation [Bélanger and Pilling, 2019, Wolff, 2004], freinent maintenant la sélection de variétés mieux adaptées aux nouvelles conditions climatiques [Wolkovich et al., 2018] et altèrent les capacités des agroécosystèmes à résister aux aléas climatiques [Forest et al., 2015] et aux aléas naturels tels que les ravageurs et agents pathogènes [Ekroth et al., 2019, White et al., 2020]. En effet, la diversité taxonomique et la diversité génétique permettent en général une meilleure résilience des communautés animales et végétales aux aléas [Oliver et al., 2015b]. Cette résilience est en général la résultante d'une redondance et d'une complémentarité entre les différentes espèces, variétés, et génotypes, dans l'exploitation des ressources (eau, lumière, nutriments), et dans les capacités de défense contre les ravageurs et pathogènes, et capacités de résistance aux aléas climatiques [Allan et al., 2011, Downing et al., 2014]. La diversité taxonomique et la diversité génétique permettent aussi sur le long terme de ralentir l'adaptation génétique des ravageurs et pathogènes à leurs hôtes [White et al., 2020]. L'utilisation des interactions positives entre espèces, variétés/races et génotypes représente l'un des principes fondamentaux

de l'agroécologie.

Les effets de la redistribution des espèces à la surface de la Terre, du fait du changement climatique, sur le fonctionnement des écosystèmes et sur la re-composition des communautés sont moins bien documentés et compris. Néanmoins, nous savons que cette redistribution des espèces perturbe les chaînes trophiques de la même manière que la modification des cycles annuels de développement mentionnés précédemment. Par exemple, l'arrivée récente du crabe royal, redoutable prédateur d'échinodermes et de mollusques, sur les fonds marins de l'antarctique, jusqu'ici inaccessibles aux crustacés à cause de la température trop basse de l'eau, a profondément modifié l'équilibre de cet écosystème probablement inchangé depuis des millions d'années [Aronson et al., 2015].

Enfin, les modifications de répartition géographique d'espèces dues au changement climatique peuvent aussi affecter le bien-être et la santé humaine. Par exemple, le changement climatique modifie l'aire de répartition géographique de nombreux vecteurs de pathogènes comme par exemple le moustique anophèle dont la répartition est en augmentation du fait du changement climatique. Cette espèce étant vecteur de la malaria, la population exposée à la malaria est en augmentation [Siraj et al., 2014].

#### **4. Le changement climatique risque de devenir la première cause de perte de biodiversité et les moyens d'adaptation sont limités**

Les projections des modèles prévoient que les effets négatifs du changement climatique sur la biodiversité vont augmenter, dans certains cas de façon exponentielle [Bellard et al., 2012, Díaz et al., 2019]. Même si les phénomènes d'extinction seront majoritairement locaux (disparition de l'espèce d'une région), le taux d'extinction totale augmentera également [Bellard et al., 2012, Thomas et al., 2004]. Même pour un réchauffement climatique limité à 2 °C, les modèles prévoient que la répartition géographique de la majorité des espèces terrestres va diminuer de façon conséquente, et que 5% des espèces seront en risque d'extinction totale, et ce pourcentage passerait à 16 avec un réchauffement de 4 °C [Díaz et al., 2019]. Les modèles prévoient également des changements considérables du fonctionnement des écosystèmes

et de leur nature, même pour 3 °C de réchauffement dans les régions boréales et 4 °C de réchauffement dans les régions tempérées [Heyder et al., 2011]. Ils prévoient également une aggravation forte des dépérissements forestiers dans la zone tempérée-boréale [Heyder et al., 2011]. Enfin, ils prévoient que les milieux marins seront tout autant affectés que les milieux terrestres avec une augmentation des taux d'extinction d'espèces dans les mers subpolaires, tropicales, et semi-fermées, et un renouvellement de 60% de la biodiversité locale qui affectera les services rendus à l'homme par les écosystèmes marins [Cheung et al., 2009]. Dans ces conditions, les capacités des aires protégées à conserver les espèces menacées seront grandement affectées [Díaz et al., 2019, Monzón et al., 2011].

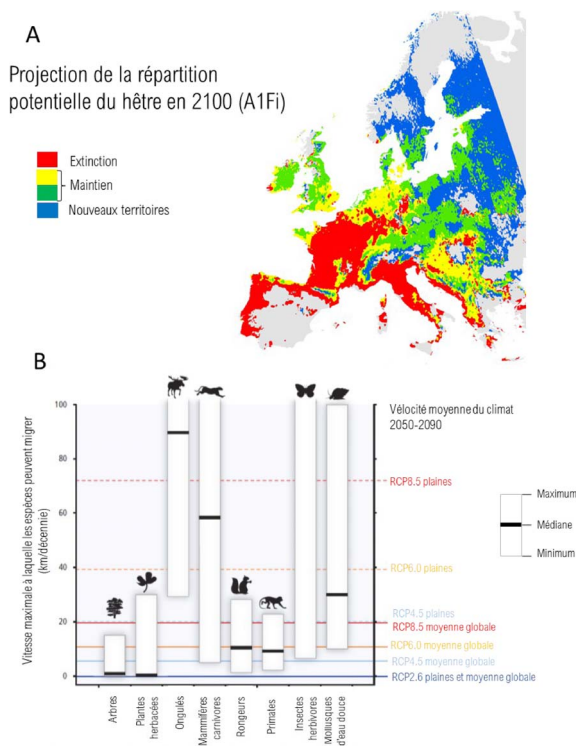
Cependant, la plupart des projections ne prennent pas en compte les capacités d'adaptation des espèces au changement climatique, car très peu de modèles en sont actuellement capables. Les moyens d'adaptation des espèces au changement climatique sont essentiellement de trois ordres : la migration, la plasticité phénotypique et l'adaptation génétique [Aitken et al., 2008, Davis and Shaw, 2001, Lavorel et al., 2017]. Les espèces peuvent échapper au changement climatique en se déplaçant vers les territoires dont le climat reste ou devient favorable à leur survie et reproduction, et échapper ainsi à l'extinction totale (Figure 4). Mais si l'on compare la vitesse du changement climatique à celle des espèces, on se rend compte que beaucoup d'espèces ne peuvent pas migrer aussi vite que le climat, et en tout premier lieu les plantes (Figure 4). Par exemple, la vitesse du changement climatique selon le scénario RCP 8.5 est supérieure à soixante-dix kilomètres par décennie alors que les vitesses maximales de migration connues chez les plantes sont de l'ordre de trente kilomètres par décennie, quand les vitesses moyennes sont de un à deux kilomètres par décennie [Field et al., 2014]. Ainsi, sans migration assistée d'individus ou de propagules (par exemple des graines) par l'homme, de nombreuses espèces seront en risque d'extinction totale avant d'avoir pu s'extirper des régions qui ne pourront plus assurer leur survie. Cependant la migration assistée par l'homme a un coût important et ne pourra être mise en œuvre que pour un nombre très limité d'espèces. En dehors des programmes de conservation d'espèces en voie d'extinction, la migration assistée est actuellement testée

en foresterie sur des espèces d'intérêt économique [Aitken and Bemmels, 2016].

Un autre moyen d'adaptation des espèces au changement climatique est ce qu'on appelle la plasticité phénotypique, lorsque celle-ci est adaptative [Merilä and Hendry, 2014]. La plasticité phénotypique adaptative est la capacité à maintenir un certain niveau de performances quand les conditions changent, ceci grâce à une modification de l'expression des gènes (Figure 3). Par exemple la vitesse de croissance des bourgeons au printemps change en fonction de la température, et la date d'éclosion des bourgeons sera d'autant plus précoce que le printemps aura été chaud. Mais cette plasticité n'est pas toujours adaptative. En utilisant des modèles capables de décrire la plasticité de la date de débourrement, ainsi que la relation entre la date de débourrement et les performances de l'arbre, Duputié et al. [2015] ont montré que dans les conditions climatiques futures, la plasticité de la date de débournement sera très majoritairement avantageuse chez le chêne et aidera cette espèce à se maintenir dans une certaine mesure dans les nouvelles conditions climatiques, alors qu'elle sera désavantageuse chez le pin sylvestre qui risque de disparaître d'une grande partie de l'Europe de l'ouest car la plasticité aura atteint ses limites chez cette espèce.

Enfin, l'adaptation ultime au changement climatique est l'évolution génétique sous l'effet de la sélection naturelle engendrée par le changement climatique lui-même. Le changement climatique exerce une pression de sélection très forte sur les êtres vivants. L'existence d'adaptations génétiques locales chez des organismes à grande aire de répartition et ayant des flux de gènes élevés (qui tendent au contraire à homogénéiser génétiquement les populations) en est une des preuves [Alberto et al., 2013]. Les preuves scientifiques d'évolution génétique sous l'effet du changement climatique se multiplient [Merilä and Hendry, 2014]. Un des exemples les plus faciles à comprendre est celui de l'évolution de la durée du jour induisant l'entrée en diapause hivernale (état temporaire de réduction forte de l'activité physiologique et métabolique) chez le moustique. En cinq ans, la durée du jour induisant la diapause chez ce moustique a diminué d'une heure en réponse au changement climatique, permettant au moustique de poursuivre son activité plus longtemps à l'automne qu'auparavant [Bradshaw and Holzap-





**FIGURE 4.** Impacts du changement climatique sur les aires de répartition des espèces. A. Projection de la répartition potentielle du hêtre en 2100 d'après le scénario climatique A1Fi et le modèle d'aire de répartition PHENOFIT. Rouge : aire dont les conditions climatiques ne pourront plus assurer la survie de l'espèce, jaune et vert : aire dont les conditions climatiques permettent la survie de l'espèce (vert : conditions plus favorables qu'avant; jaune : conditions moins favorables qu'avant), bleu : aire dont le climat permet la survie de l'espèce et dont l'espèce était auparavant absente. Illustration adaptée de Saltré et al. [2015]. B. Vitesses maximales auxquelles les espèces peuvent migrer et vitesse du climat selon les différents scénarios. Figure adaptée de la figure SPM5 du rapport du groupe de travail n°2 du GIEC [Field et al., 2014].

fel, 2008]. Cette évolution génétique de la sensibilité du moustique à la durée du jour pour entrer en diapause s'explique par le fait que les températures plus chaudes à l'automne permettent au moustique de poursuivre son activité et sa reproduction, et qu'il devient donc avantageux de rentrer en diapause plus tard. Ainsi, les gènes présents dans les populations de moustiques qui induisaient une entrée en diapause plus tard que les autres gènes présents en répondant à une durée du jour plus courte ont été sélectionnés et se sont propagés dans les populations. Mais le moustique a un temps de génération extrêmement court. Il est capable de faire plusieurs générations par an. La sélection naturelle est donc très efficace chez cette espèce car la sélection

opère plusieurs fois par an. La sélection naturelle sera également d'autant plus efficace que la diversité génétique dans les populations sera élevée et que les tailles de population seront élevées. Mais toutes les espèces ne remplissent pas ces conditions. Beaucoup d'espèces ont des temps de génération très longs, comme par exemple beaucoup de grands mammifères et les arbres. Par ailleurs, la diversité génétique est souvent faible chez les espèces rares [Gitzendanner and Soltis, 2000] et elle a eu tendance globalement à diminuer chez les espèces domestiquées par l'homme [Bélanger and Pilling, 2019] [Wolff, 2004] et les espèces dont la superficie des habitats a été beaucoup réduite par les activités humaines [Allentoft and Brien, 2010]. Nos capacités à prévoir à quelle vitesse

les espèces vont réussir à s'adapter génétiquement au changement climatique sont actuellement très faibles car nous sommes encore loin de comprendre les bases génétiques sous-jacentes aux réponses évolutives au changement climatique (mais voir Gauzere et al., 2020). L'homme a cependant deux moyens à sa disposition pour accélérer la sélection naturelle dans les populations naturelles : augmenter la diversité génétique dans les populations en procédant à des flux de gènes assistés, et augmenter les superficies des habitats des espèces afin d'augmenter les tailles de population par exemple en restaurant les habitats dégradés ou en augmentant les surfaces des aires protégées. Ces moyens d'intervention, comme la migration assistée, ont des coûts importants. Néanmoins, le second levier d'action, à savoir augmenter les superficies des habitats des espèces, rentre déjà dans certaines préconisations relatives aux Objectifs de Développement Durable que la France a ratifiés, et il sera sans doute le plus efficace et le plus durable.

## 5. Conclusion

Le changement climatique affecte profondément la biosphère de très nombreuses manières, car les conditions climatiques déterminent les performances des organismes vivants, leur capacité à se reproduire et à survivre. Ces modifications des performances des organismes vivants modifient en conséquence le fonctionnement des écosystèmes, la répartition géographique des espèces, et la biodiversité. Le changement climatique est actuellement la troisième cause de perte de biodiversité et risque de devenir à court terme la première. Les moyens d'adaptation au changement climatique sont limités pour de très nombreuses espèces. Ainsi, au-delà de la nécessaire réduction drastique des émissions de gaz à effet de serre pour limiter le réchauffement climatique, il est également nécessaire d'agir fortement sur les autres causes de perte de biodiversité et de mettre en œuvre des solutions fondées sur la nature. Les solutions fondées sur la nature sont des actions visant à protéger, gérer de manière durable et restaurer des écosystèmes naturels ou modifiés pour relever directement les défis de société de manière efficace et adaptative, tout en assurant le bien-être humain et en produisant des bénéfices pour la biodiversité [France, 2018]. Seules ces solutions permettront de restaurer et de maintenir les processus

écologiques et les processus évolutifs qui permettront aux espèces de faire face efficacement et durablement au changement climatique. De plus, les mesures d'atténuation du changement climatique et de protection de la nature peuvent être synergiques (par exemple enrayer la déforestation, reboiser de manière raisonnée, améliorer la santé des sols, les pratiques agricoles, etc ...).

## Références

- Aitken, S. N. and Bemmels, J. B. (2016). Time to get moving : assisted gene flow of forest trees. *Evol. Appl.*, 9(1) :271–290.
- Aitken, S. N., Yeaman, S., Holliday, J. A., Wang, T. L., and Curtis-McLane, S. (2008). Adaptation, migration or extirpation : climate change outcomes for tree populations. *Evol. Appl.*, 1 :95–111.
- Alberto, F. J., Aitken, S. N., Alía, R., González-Martínez, S. C., Hänninen, H., Kremer, A., Lefèvre, F., Lenormand, T., Yeaman, S., Whetten, R., and Savolainen, O. (2013). Potential for evolutionary responses to climate change - evidence from tree populations. *Glob. Change Biol.*, 19 :1645–1661.
- Allan, E., Weisser, W., Weigelt, A., Roscher, C., Fischer, M., and Hillebrand, H. (2011). More diverse plant communities have higher functioning over time due to turnover in complementary dominant species. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 108 :17034–17039.
- Allard, V., Aubinet, M., Buchmann, N., Ciais, P., Reichstein, M., Viovy, N., Granier, A., and Oge, J. (2005). Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 437 :529–533.
- Allentoft, M. E. and Brien, J. O. (2010). Global amphibian declines, loss of genetic diversity and fitness : a review. *Diversity*, 2 :47–71.
- Anderson, J. V., Horvath, D. P., Chao, W. S., and Foley, M. E. (2010). Bud dormancy in perennial plants : a mechanism for survival. In Lubzens, E. and Clark, M., editors, *Dormancy and Resistance in Harsh Environments*. Springer-Verlag, Berlin.
- Aronson, R. B., Smith, K. E., Vos, S. C., McClintock, J. B., Amsler, M. O., Moksnes, P., Ellis, D. S., Kaeli, J., Singh, H., Bailey, J. W., Schiferl, J. C., Van Woesik, R., Martin, M. A., Steffel, B. V., Deal, M. E., and Lazarus, S. M. (2015). No barrier to emergence of bathyal king crabs on the Antarctic shelf. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 112(42) :12997–13002.



- Asse, D., Chuine, I., Vitasse, Y., Yoccoz, N. G., Delpierre, N., Badeau, V., Delestrade, A., and Randin, C. F. (2018). Warmer winters reduce the advance of tree spring phenology induced by warmer springs in the Alps. *Agric. Meteorol.*, 252 :220–230.
- Asseng, S., Foster, I., and Turner, N. C. (2011). The impact of temperature variability on wheat yields. *Glob. Change Biol.*, 17 :997–1012.
- Battisti, A., Stastny, M., Netherer, S., Robinet, C., Schopf, A., Roques, A., and Larsson, S. (2005). Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecol. Appl.*, 15 :2084–2096.
- Beaugrand, G., Brander, K. M., Alistair Lindley, J., Souissi, S., and Reid, P. C. (2003). Plankton effect on cod recruitment in the North Sea. *Nature*, 426 :661–664.
- Bélanger, J. and Pilling, D., editors (2019). *The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture*. FAO.
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., and Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecol. Lett.*, 15 :365–377.
- Bonan, G. B. (2008). Forests and climate change : forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests. *Science*, 320(80) :1444–1449.
- Bradshaw, W. E. and Holzapfel, C. M. (2008). Genetic response to rapid climate change : it's seasonal timing that matters. *Mol. Ecol.*, 17 :157–166.
- Brommer, J. E., Lehikoinen, A., and Valkama, J. (2012). The breeding ranges of Central European and Arctic bird species move poleward. *PLoS One*, 7 :1–7.
- Bronson, F. H. (2009). Climate change and seasonal reproduction in mammals. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, 364 :3331–3340.
- Cahill, A. E., Aiello-Lammens, M. E., Caitlin Fisher-Reid, M., Hua, X., Karanewsky, C. J., Ryu, H. Y., Sbeglia, G. C., Spagnolo, F., Waldron, J. B., Warsi, O., and Wiens, J. J. (2013). How does climate change cause extinction? *Proc. R. Soc. B*, 280.
- Callaghan, T. V., Björn, L. O., Chernov, Y., Chapin, T., Christensen, T. R., Huntley, B., Ims, R. A., Johansson, M., Jolly, D., Jonasson, S., Matveyeva, N., Panikov, N., Oechel, W., Shaver, G., Elster, J., Henttonen, H., Laine, K., Taulavuori, K., Taulavuori, E., and Zöckler, C. (2004). Biodiversity, distributions and adaptations of arctic species in the context of environmental change. *AMBIO A J. Hum. Environ.*, 33 :404–417.
- Campoy, J. A., Ruiz, D., and Egea, J. (2011). Dormancy in temperate fruit trees in a global warming context : a review. *Sci. Hortic.*, 130 :357–372. Amsterdam.
- Carnicer, J., Coll, M., Ninyerola, M., Pons, X., Sánchez, G., and Peñuelas, J. (2011). Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-type drought. *Proc. Natl Acad. Sci. USA*, 108 :1474–1478.
- Chapin, F. S. (2005). Role of land-surface changes in Arctic summer warming. *Science*, 310(80) :657–660.
- Chapin, F. S., Randerson, J. T., McGuire, A. D., Foley, J. A., and Field, C. B. (2008). Changing feedbacks in the climate-biosphere system. *Front. Ecol. Environ.*, 6 :313–320.
- Cheung, W. W. L., Lam, V. W. Y., Sarmiento, J. L., Kearney, K., Watson, R., and Pauly, D. (2009). Projecting global marine biodiversity impacts under climate change scenarios. *Fish Fish.*, 10 :235–251.
- Chuine, I., Bonhomme, M., Legave, J. M. J.-M., García de Cortázar-Atauri, I., Charrier, G., Lacoïnte, A., Améglio, T., Garcia de Cortazar-Atauri, I., Charrier, G., Lacoïnte, A., Améglio, T., and Universit, C. (2016). Can phenological models predict tree phenology accurately in the future? The unrevealed hurdle of endodormancy break. *Glob. Change Biol.*, 22 :3444–3460.
- Chuine, I. and Régnière, J. (2017). Process-based models of phenology for plants and animals. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 48 :159–182.
- Cleland, E. E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H. A., Schwartz, M. D., and Schwartz, D. (2007). Shifting plant phenology in response to global change. *Trends Ecol. Evol.*, 22 :357–365.
- Cosgrove, D. (1986). Biophysical control of plant cell growth. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 37 :377–340.
- Cossins, A. H. and Bowler, K. (1987). *Temperature Biology of Animals*. Chapman and Hall, London, UK.
- Davis, M. B. and Shaw, R. G. (2001). Range shifts and adaptive responses to Quaternary climate change. *Science*, 292 :673–679.
- Delpierre, N., Soudani, K., Francois, C., Kostner, B., Pontailier, J. Y., Nikinmaa, E., Misson, L., Aubinet, M., Bernhofer, C., Granier, A., Grunwald, T., Heinesch, B., Longdoz, B., Ourcival, J. M., Rambal,

- S., Vesala, T., and Dufrene, E. (2009). Exceptional carbon uptake in European forests during the warm spring of 2007 : a data-model analysis. *Glob. Change Biol.*, 15 :1455–1474.
- Díaz, S., Settele, J., Brondízio, E. S., Ngo, H. T., Agard, J., Arneeth, A., Balvanera, P., Brauman, K. A., Butchart, S. H. M., Chan, K. M. A., Lucas, A. G., Ichii, K., Liu, J., Subramanian, S. M., Midgley, G. F., Miloslavich, P., Molnár, Z., Obura, D., Pfaff, A., Polasky, S., Purvis, A., Razzaque, J., Reyers, B., Chowdhury, R. R., Shin, Y. J., Visseren-Hamakers, I., Willis, K. J., and Zayas, C. N. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. *Science*, 366(80).
- Dirnböck, T., Essl, F., and Rabitsch, W. (2011). Disproportional risk for habitat loss of high-altitude endemic species under climate change. *Glob. Change Biol.*, 17 :990–996.
- Downing, A. L., Brown, B., and Leibold, M. A. (2014). Multiple diversity – stability mechanisms enhance population and community stability in aquatic food webs. *Ecology*, 95 :173–184.
- Duputié, A., Rutschmann, A., Ronce, O., and Chuine, I. (2015). Phenological plasticity will not help all species adapt to climate change. *Glob. Change Biol.*, 21 :3062–3073.
- Ekroth, A. K. E., Rafaluk-Mohr, C., and King, K. C. (2019). Host genetic diversity limits parasite success beyond agricultural systems : a meta-analysis. *Proc. R. Soc. B*, 286.
- Engler, R., Randin, C. F., Thuiller, W., Dullinger, S., Zimmermann, N. E., Araújo, M. B., Pearman, P. B., Le Lay, G., Piedallu, C., Albert, C. H., Choler, P., Coldea, G., De Lamo, X., Dirnböck, T., Gégout, J. C., Gómez-García, D., Grytnes, J. A., Heegaard, E., Høistad, F., Nogués-Bravo, D., Normand, S., Puşcaş, M., Sebastià, M. T., Stanisci, A., Theurillat, J. P., Trivedi, M. R., Vittoz, P., and Guisan, A. (2011). 21st century climate change threatens mountain flora unequally across Europe. *Glob. Change Biol.*, 17 :2330–2341.
- Ferris, R., Ellis, R. H., Wheeler, T. R., and Hadley, P. (1998). Effect of high temperature stress at anthesis on grain yield and biomass of field-grown crops of wheat. *Ann. Bot.*, 82 :631–639.
- Field, C. B., Barros, V. R., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Aalst, M., van Adger, W. N., Arent, D. J., Barnett, J., Betts, R., and Al, E. (2014). Technical Summary. In Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., and White, L. L., editors, *Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pages 35–94. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Forest, I., Craven, D., Connolly, J., Loreau, M., Schmid, B., Beierkuhnlein, C., Bezemer, T. M., Bonin, C., Bruelheide, H., Luca, E., De Ebeling, A., Griffin, J. N., Guo, Q., Hautier, Y., and Al, E. (2015). Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, 526 :574–578.
- France, U. (2018). *Les solutions fondées sur la Nature pour lutter contre les changements climatiques et réduire les risques naturels en France*. Paris, France. UICN. France.
- Fu, Y. H., Zhao, H., Piao, S., Peaucelle, M., Peng, S., Zhou, G., Ciais, P., Song, Y., Vitasse, Y., Zeng, Z., Janssens, I. A., Huang, M., Menzel, A., and Pen, J. (2015). Declining global warming effects on the phenology of spring leaf unfolding. *Nature*, 526 :104–107.
- Gattuso, J. P., Magnan, A. K., Bopp, L., Cheung, W. W. L., Duarte, C. M., Hinkel, J., Mcleod, E., Micheli, F., Oschlies, A., Williamson, P., Billé, R., Chalastani, V. I., Gates, R. D., Irisson, J. O., Middelburg, J. J., Pörtner, H. O., and Rau, G. H. (2018). Ocean solutions to address climate change and its effects on marine ecosystems. *Front. Mar. Sci.*, 5 :337.
- Gauzere, J., Teuf, B., Davi, H., Chevin, L., Caignard, T., Delzon, S., and Chuine, I. (2020). Where is the optimum? Predicting the variation of selection along climatic gradients and the adaptive value of plasticity. A case study on tree phenology. *Evol. Lett.*, 4(2) :109–123.
- Gillooly, J. F., Charnov, E. L., West, G. B., Savage, V. M., and Brown, J. H. (2002). Effects of size and temperature on developmental time. *Nature*, 417 :70–73.
- Gilman, S. E., Urban, M. C., Tewksbury, J., Gilchrist, G. W., and Holt, R. D. (2010). A framework for community interactions under climate change. *Trends Ecol. Evol.*, 25 :325–331.
- Gitzendanner, M. and Soltis, P. (2000). Patterns of ge-

- netic variation in rare and widespread plant congeners. *Am. J. Bot.*, 87 :783–792.
- Grace, J. and Rayment, M. (2000). Respiration in the balance. *Nature*, 404 :819–820.
- Heyder, U., Schaphoff, S., and Gerten, D. (2011). Risk of severe climate change impact on. *Environ. Res. Lett.*, 6.
- Hickling, R., Roy, D. B., Hill, J. K., Fox, R., and Thomas, C. D. (2006). The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Glob. Change Biol.*, 12 :450–455.
- Hoegh-Guldberg, O. and Bruno, J. F. (2010). The impact of climate change on the world's marine ecosystems. *Science*, 328(80) :1523–1528.
- IPCC (2013). *Working Group I contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. Climate Change 2013 : The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- IPCC (2014). *Working Group II contribution to the IPCC Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- Jump, A. S., Ruiz-benito, P., Allen, C. D., Kitzberger, T., and Fensham, R. O. D. (2017). Structural overshoot of tree growth with climate variability and the global spectrum of drought-induced forest dieback. *Glob. Chang. Biol.*, 23 :3742–3757.
- Koh, L. P., Dunn, R. R., Sodhi, N. S., Colwell, R. K., Proctor, H. C., and Smith, V. S. (2004). Species coextinctions and the biodiversity crisis. *Science*, 305(80) :1632–1634.
- Lavorel, S., Lebreton, D., and Maho, Y. L. (2017). Les mécanismes d'adaptation de la biodiversité aux changements climatiques et leurs limites. In *Rapport de l'Académie des Sciences*, pages 1–157. Institut de France, Paris.
- Lempereur, M., Limousin, J.-M., Guibal, F., Ourcival, J. M., Rambal, S., Ruffault, J., and Mouillot, F. (2016). Recent climate hiatus revealed dual control by temperature and drought on the stem growth of Mediterranean *Quercus ilex*. *Glob. Chang. Biol.*, 23(1) :42–55.
- Lenoir, J., Gégout, J. C., Marquet, P. A., De Ruffray, P., and Brisse, H. (2008). A significant upward shift in plant species optimum elevation during the 20th century. *Science*, 320(80) :1768–1771.
- Lenz, A., Hoch, G., Vitasse, Y., and Körner, C. (2013). European deciduous trees exhibit similar safety margins against damage by spring freeze events along elevational gradients. *New Phytol.*, 200 :1166–1175.
- Lobell, D. B., Schlenker, W., and Costa-Roberts, J. (2011). Climate trends and global crop production since 1980. *Science*, 333(80) :616–621.
- Malcolm, J. R., Liu, C., Neilson, R. P., Hansen, L., and Hannah, L. (2006). Global warming and extinctions of endemic species from biodiversity hotspots. *Conserv. Biol.*, 20 :538–548.
- Marland, G., Pielke, R. A., Apps, M., Avissar, R., Betts, R. A., Davis, K. J., Frumhoff, P. C., Jackson, S. T., Joyce, L. A., Kauppi, P., Katzenberger, J., MacDicken, K. G., Neilson, R. P., Niles, J. O., Niyogi, D., Dutta, S., Norby, R. J., Pena, N., Sampson, N., and Xue, Y. (2003). The climatic impacts of land surface change and carbon management, and the implications for climate-change mitigation policy. *Clim. Policy*, 3 :149–157.
- Menzel, A. (2003). Plant phenological 'Fingerprints'. In Schwartz, M. D., editor, *Phenology : An Integrative Environmental Science*, pages 319–330. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Menzel, A. and Fabian, P. (1999). Growing season extended in Europe. *Nature*, 397 :659.
- Menzel, A., Sparks, T. H., Estrella, N., Koch, E., Aaasa, A., Ahas, R., Alm-Kübler, K., Bissolli, P., Braslavská, O., Briede, A., Chmielewski, F. M., Crepinsek, Z., Curnel, Y., Dahl, Å., Defila, C., Donnelly, A., Filella, Y., Jatzcak, K., Måge, F., Mestre, A., Nordli, Ø., Peñuelas, J., Pirinen, P., Remišová, V., Scheffinger, H., Striz, M., Susnik, A., Van Vliet, A. J. H., Wielgolaski, F. E., Zach, S., and Züst, A. (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Glob. Change Biol.*, 12 :1969–1976.
- Merilä, J. and Hendry, A. P. (2014). Climate change, adaptation, and phenotypic plasticity : the problem and the evidence. *Evol. Appl.*, 7 :1–14.
- Monzón, J., Moyer-Horner, L., and Palamar, M. B. (2011). Climate change and species range dynamics in protected areas. *Bioscience*, 61 :752–761.
- Morin, X., Lechowicz, M. J., Augspurger, C., O'keefe, J., Viner, D., and Chuine, I. (2009). Leaf phenology in 22 North American tree species during the 21st century. *Gob. Change Biol.*, 15 :961–975.
- Morin, X., Roy, J., Sonie, L., and Chuine, I. (2010). Changes in leaf phenology of three European

- oak species in response to experimental climate change. *New Phytol.*, 186 :900–910.
- Morueta-holme, N., Engemann, K., Sandoval-acuña, P., Jonas, J. D., and Segnitz, R. M. (2015). Strong upslope shifts in chimborazo's vegetation over two centuries since humboldt. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(41) :12741–12745.
- Myneni, R. B., Keeling, C. D., Tucker, C. J., Asrar, G., and Nemani, R. R. (1997). Increasing plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991. *Nature*, 386 :698–702.
- Oliver, T. H., Heard, M. S., Isaac, N. J. B., Roy, D. B., Procter, D., Eigenbrod, F., Freckleton, R., Hector, A., Orme, C. D. L., Petchey, O. L., Proença, V., Raffaelli, D., Suttle, K. B., Mace, G. M., Martín-lópez, B., Woodcock, B. A., and Bullock, J. M. (2015a). Biodiversity and resilience of ecosystem functions. *Trends Ecol. Evol.*, 30 :673–684.
- Oliver, T. H., Isaac, N. J. B., August, T. A., Woodcock, B. A., Roy, D. B., and Bullock, J. M. (2015b). Declining resilience of ecosystem functions under biodiversity loss. *Nat. Commun.*, 6.
- Parmesan, C. and Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. *Nature*, 421 :37–42.
- Pecl, G., Araujo, M. B., Bell, J. D., Blanchard, J., Bonebrake, T. C., Pecl, G. T., Araujo, M. B., and Bell, J. (2017). Biodiversity redistribution under climate change : impacts on ecosystems and human well-being. *Science*, 355(80) :1–9.
- Piao, S., Friedlingstein, P., Ciais, P., Viovy, N., and Demarty, J. (2007). Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the Northern Hemisphere over the past 2 decades. *Global Biogeochem. Cycles*, 21 :1–11.
- Renner, S. S. and Zohner, C. M. (2018). Climate change and phenological mismatch in trophic interactions among plants, insects, and vertebrates. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 49 :165–182.
- Richardson, A. D., Black, T. A., Ciais, P., Delbart, N., Friedl, M. A., Gobron, N., Hollinger, D. Y., Kutsch, W. L., Longdoz, B., Luyssaert, S., Migliavacca, M., Montagnani, L., Munger, J. W., Moors, E., Piao, S. L., Rebmann, C., Reichstein, M., Saigusa, N., Tomelleri, E., Vargas, R., and Varlagin, A. (2010). Influence of spring and autumn phenological transitions on forest ecosystem productivity. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 365 :3227–3246.
- Ryan, M. G. (1991). Effects of climate change on plant respiration. *Ecological Applications*, 1 :157–167.
- Saltré, F., Duputié, A., Gaucherel, C., and Chuine, I. (2015). How climate, migration ability and habitat fragmentation affect the projected future distribution of European beech. *Glob. Chang. Biol.*, 21(2) :897–910.
- Schlenker, W. and Roberts, M. J. (2009). Nonlinear temperature effects indicate severe damages to U.S. crop yields under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106 :15594–15598.
- Schulte, P. M. (2015). The effects of temperature on aerobic metabolism : towards a mechanistic understanding of the responses of ectotherms to a changing environment. *J. Exp. Biol.*, 218 :1856–1866.
- Sheffield, J., Wood, E. F., and Roderick, M. L. (2012). Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 491 :435–438.
- Siraj, A. S., Santos-Vega, M., Bouma, M. J., Yadeta, D., Carrascal, D. R., and Pascual, M. (2014). Altitudinal Changes in Malaria Incidence in Highlands of Ethiopia and Colombia. *Science*, 343(80) :1154–1158.
- Suess, E. (1885). *Das Antlitz der Erde, Vol I*. G. Freytag, Leipzig, Germany.
- Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., Erasmus, B. F. N., de Siqueira, M. F., Grainger, A., Hannah, L., Hughes, L., Huntley, B., van Jaarsveld, A. S., Midgley, G. F., Miles, L., Ortega-Huerta, M. A., Peterson, A. T., Phillips, O. L., and Williams, S. E. (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427 :145–148.
- Vitasse, Y., François, C., Delpierre, N., Dufrêne, E., Kremer, A., Chuine, I., and Delzon, S. (2011). Assessing the effects of climate change on the phenology of European temperate trees. *Agric. Meteorol.*, 151 :969–980.
- Vitasse, Y., Schneider, L., Rixen, C., Christen, D., and Rebetez, M. (2018). Increase in the risk of exposure of forest and fruit trees to spring frosts at higher elevations in Switzerland over the last four decades. *Agric. Meteorol.*, 248 :60–69.
- Walther, G. R. (2003). Plants in a warmer world. *Perspect. Plant Ecol. Evol. Syst.*, 6 :169–185.
- Walther, G. R. (2010). Community and ecosystem responses to recent climate change. *Phil. Trans. R. Soc. B*, 365 :2019–2024.

- Walther, G. R., Berger, S., and Sykes, M. T. (2005). An ecological “footprint” of climate change. *Proc. R. Soc. B*, 272 :1427–1432.
- Walther, G.-R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J. C., Fromentin, J.-M., Hoegh-Guldberg, O., and Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416 :389–395.
- Wardlaw, I. and Wrigley, C. (1994). Heat tolerance in temperate cereals – an overview. *Aust. J. Plant Physiol.*, 21 :695–703.
- Wheeler, T. R., Batts, G. R., Ellis, R. H., Hadley, P., and Morison, J. I. L. (1996). Growth and yield of winter wheat (*Triticum aestivum*) crops in response to CO<sub>2</sub> and temperature. *J. Agric. Sci.*, 12 :37–48.
- White, P. S., Choi, A., Pandey, R., Menezes, A., Penley, M., Gibson, A. K., Roode, J. D., and Morran, L. (2020). Host heterogeneity mitigates virulence evolution. *Biol. Lett.*, 16.
- Wolff, F. (2004). Industrial transformation and agriculture : agrobiodiversity loss as sustainability problem. In Jacob, K., Binder, M., and Wieczorek, A., editors, *Proceedings of the 2003 Berlin Conference on the Human Dimensions of Global Environmental Change*, pages 338–355. Environmental Policy Research Centre, Berlin.
- Wolkovich, E. M., García De Cortázar-Atauri, I., Morales-Castilla, I., Nicholas, K. A., and Lacombe, T. (2018). From Pinot to Xinomavro in the world’s future wine-growing regions. *Nat. Clim. Change*, 8 :29–37.
- Wood, T. E., Cavaleri, M. A., and Reed, S. C. (2012). Tropical forest carbon balance in a warmer world : a critical review spanning microbial- to ecosystem-scale processes. *Biol. Rev.*, 87 :912–927.



---

Facing climate change, the range of possibilities / *Face au changement climatique, le champ des possibles*

# Énergie et climat : défis et innovations

## *Energy and climate : challenges and innovations*

Didier Roux<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Académie des Sciences, 23 Quai de Conti, 75270 Paris Cedex 06, France

Courriel: [ddaroux1@gmail.com](mailto:ddaroux1@gmail.com)

**Résumé.** L'accès à l'énergie est un facteur clé du développement économique des pays. On examinera dans un premier temps l'évolution des différents modes d'accès à l'énergie et sa corrélation avec la population mondiale et le PIB des pays. Nous verrons que les objectifs de diminution des émissions de gaz carbonique qui demandent une transformation profonde de notre accès à l'énergie seront très difficiles à atteindre. Nous verrons aussi que l'amélioration thermique des bâtiments, et en particulier la rénovation de l'habitat ancien, est une des pistes possibles.

**Abstract.** Access to energy is a key factor in the economic development of countries. We will first examine the evolution of different ways to access to energy and their correlations with world population and countries' GDP. We will see that the objectives of reducing carbon dioxide emissions which require a profound transformation of our access to energy will be very difficult to achieve. We will also see that the thermal improvement of buildings, and in particular the renovation of existing housing, is one of the possible objective.

**Mots-clés.** Énergie, Climat, Efficacité énergétique, Bâtiment, Rénovation.

### 1. Introduction

L'énergie est une notion qui a mis longtemps à être correctement définie en physique (seulement au cours des travaux du XIX<sup>ème</sup> siècle). Aujourd'hui, nous en avons une idée précise et sommes capable de comprendre comment la décrire et comment l'utiliser.

La notion la plus importante est la notion de conservation : l'énergie se conserve dans un système isolé : c'est le premier principe de la thermodynamique.

L'autre notion importante, plus difficile à appréhender, est le fait que la plupart des transformations réelles de l'énergie sont irréversibles et qu'il a fallu

introduire la notion d'entropie pour expliquer le comportement expérimental des transformations d'énergie entre systèmes. Une conséquence de cette notion d'entropie est qu'au cours d'une transformation énergétique irréversible (ce qui est pratiquement toujours le cas) d'une énergie à une autre, l'entropie ne peut qu'augmenter et ne permet pas d'avoir accès à la totalité de l'énergie utile disponible.

L'homme a toujours utilisé de l'énergie pour permettre aux sociétés d'évoluer et de progresser. D'abord et avant tout, il a utilisé l'énergie de son corps ou celle des animaux, mais très rapidement il a réalisé que d'autres sources, non animales, pouvaient remplacer le travail animal. Ainsi, aujourd'hui, l'homme utilise, en moyenne dans le monde,

environ dix mille fois plus d'énergie que celle qu'il est capable de produire avec son corps, car cette énergie est produite par des moyens industriels.

## 2. Quelles sont ces énergies? D'où proviennent-elles?

On classe le plus souvent les sources énergétiques utilisées par l'homme en deux catégories : les sources non renouvelables et celles qui sont renouvelables. Ce terme indique simplement que, dans le premier cas, l'homme épuise un stock préexistant sur terre et que, dans le second cas, il utilise une source qui se renouvelle sur une échelle de temps assez courte pour que les ressources soient reconstituées au fur et à mesure de leur consommation.

Ainsi les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) ne sont pas renouvelables. Elles représentent un « stock » ayant mis des centaines de milliers d'années à se constituer dans le passé et elles sont consommées en masse depuis une centaine d'année. Elles seront probablement épuisées à cette échelle de temps.

De même, l'uranium, à la base de l'énergie nucléaire, est utilisé en consommant le minerai présent dans le sol terrestre. Il n'est pas à proprement parlé renouvelable, même si certaines technologies (comme les générateurs à neutrons rapides ou la fusion) ont un potentiel de production qui ne feraient consommer qu'une petite partie du stock disponible.

Par contre, l'énergie photovoltaïque et/ou l'énergie éolienne qui prélèvent, sans que la source n'en soit affectée, de l'énergie issue du soleil ou bien qui provient des vents, sont des énergies renouvelables (en considérant que le soleil a une durée de vie infinie, ce qui est acceptable à l'échelle de la vie humaine).

L'énergie hydraulique est aussi une parfaite illustration d'énergie renouvelable. En effet, les pluies d'hiver permettent de remplir les réservoirs en altitude, puis l'eau stockée est ensuite utilisée pour faire tourner des turbines par gravité. La biomasse (bois, plantes, etc.) peut aussi être considérée comme renouvelable, à condition que l'on replante la même quantité de végétal que l'on prélève (l'exemple de la gestion de la forêt landaise en est une parfaite illustration).

Toutes ces énergies permettent d'une façon ou d'une autre de produire du travail mécanique et de la chaleur, ce qui facilite la vie des hommes et a permis le développement des sociétés modernes.

En fait, l'homme ne produit pas de l'énergie, il ne fait que la transformer d'une forme à une autre. Par exemple, il transforme la chaleur en énergie mécanique dans les moteurs thermiques puis éventuellement en énergie électrique avec des turbines et des alternateurs. Cette électricité est ensuite utilisée pour produire de nouveau de la chaleur, du travail mécanique ou toute autre forme d'énergie (de la lumière par exemple).

Les sources d'énergies sont donc gratuites et à notre disposition : les énergies fossiles sont, depuis des millénaires, stockées dans le sol; le soleil et le vent sont aussi disponibles pour tous. Le coût de l'énergie n'est donc pas le coût pour « produire » de l'énergie puisque l'homme ne produit pas d'énergie en tant que telle mais le prix de l'accès aux matières premières (la rente) et du coût de la transformation (souvent liés à des investissements industriels).

## 3. Évolution des consommations énergétiques

Lorsque l'on suit la consommation énergétique mondiale<sup>1</sup> comparée à l'accroissement de la population,<sup>2</sup> on remarque non seulement que les courbes suivent une croissance quasiment exponentielle depuis le début de l'ère industrielle (XIX<sup>ème</sup> siècle), mais aussi que leur croissance est relativement équivalente. Donc, on peut dire qu'au premier ordre, la consommation énergétique suit l'accroissement de la population. Lorsque l'on calcule la consommation énergétique mondiale par habitant,<sup>3</sup> on s'aperçoit cependant, qu'au deuxième ordre, elle augmente aussi exponentiellement. Plus généralement, il y a une très forte corrélation entre le Produit Intérieur Brut (PIB) et la consommation énergétique.<sup>4</sup> Si l'on regarde pays par pays, il est intéressant de voir que si, en moyenne, on retrouve cette corrélation, il y a

<sup>1</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/World\\_energy\\_consumption](https://en.wikipedia.org/wiki/World_energy_consumption).

<sup>2</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/World\\_population](https://en.wikipedia.org/wiki/World_population).

<sup>3</sup><https://ourworldindata.org/energy>.

<sup>4</sup><https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/correlation-of-per-capita-energy>.

cependant une certaine dispersion dans les courbes. Pour le même PIB, certains pays peuvent dépenser presque 10 fois plus d'énergie que d'autres. On peut donc en conclure que, de façon non surprenante, la consommation énergétique est liée à l'activité économique à la fois par la taille de la population et par la « production » de richesses. Cependant, il existe des différences notables entre pays à peu près identiques du fait que des différences culturelles entraînent des variations importantes dans la consommation énergétique d'un pays.

Intéressons-nous maintenant aux évolutions des différentes sources énergétiques au cours du temps.

La première source d'énergie extérieure à l'homme lui-même a été le bois et plus généralement la biomasse. Tant que la densité humaine était assez faible et que le prélèvement sur l'environnement n'était que marginal par rapport à la quantité produite naturellement, cette ressource était renouvelable. Malheureusement, la combinaison de l'accroissement de la population et de l'usage de plus en plus répandu d'une température des logements plus confortable pour y vivre, donc plus élevée, a conduit à des prélèvements massifs qui ont contribué, dans certains endroits du globe, à la disparition des forêts. Il a fallu, alors, trouver d'autres sources de chaleur pour produire bien-être et travail. La découverte des énergies fossiles a été une révolution du fait de leur abondance, de leur facilité d'accès et d'utilisation. Le charbon a été, dès le début du XIX<sup>ème</sup> siècle, une source importante d'énergie et a largement contribué à l'industrialisation de l'Europe puis du reste du monde. L'examen des consommations des différentes formes d'énergie fossile se montre intéressant.<sup>5</sup> Pendant près de 100 ans, on a pu constater une augmentation de l'utilisation du charbon par habitant, pour atteindre finalement un plafond depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle. Le pétrole a pris ensuite le relais vers la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle et il n'a pas encore cessé de croître. Plus récemment, au début du XX<sup>ème</sup> siècle, le gaz naturel est apparu. Son utilisation par habitant est toujours en augmentation. L'électricité, historiquement produite avec des énergies fossiles, a vu se diversifier les sources de production. L'hydroélectricité, tout d'abord, avec la construction des barrages qui s'est échelonnée en France des années

30 jusqu'aux années 70. Puis, juste après la seconde guerre mondiale, une nouvelle forme de production d'énergie électrique liée à l'énergie nucléaire est apparue. Des réacteurs nucléaires civils se sont développés. Dès les années 60, La France a pris la décision (décision renforcée par les crises pétrolières des années 70) d'implémenter cette technologie aboutissant à une pleine puissance de production à la fin des années 90, soit 30 à 40 ans après la décision de lancer le programme.

Cet exemple nous montre que la mise en place et les évolutions de l'utilisation des ressources énergétiques à l'échelle d'un pays se font sur des temps très longs, soit plusieurs dizaines d'années. Il faut donc anticiper longtemps à l'avance les évolutions, faute de quoi la réaction dans l'urgence conduit à des difficultés qui peuvent être majeures.

Lorsque l'on fait le bilan des consommations énergétiques d'un pays, la distinction entre énergie finale et énergie primaire se révèle importante. En effet, selon que l'on compte en énergie finale ou en énergie primaire, de sérieuses différences apparaissent. Cela provient du fait que si les énergies fossiles sont considérées comme des énergies primaires, l'énergie électrique n'est pas considérée comme une énergie primaire : l'électricité provient de la transformation d'une énergie primaire en énergie électrique et, comme nous l'avons vu, une partie de l'énergie primaire est « perdue » (non utilisable) dans cette transformation...L'électricité provient en grande partie de la transformation de chaleur en énergie mécanique puis électrique. L'exemple des centrales à gaz (ou à charbon ou au fuel) est démonstratif : un combustible fossile est brûlé pour produire de la chaleur (énergie thermique), avec laquelle on fait de la vapeur d'eau sous pression qui fait tourner des turbines (énergie mécanique) permettant de produire de l'électricité avec des alternateurs. Le rapport entre l'énergie thermique dépensée et l'énergie électrique disponible est de l'ordre de 3, soit un rendement de 30% environ. Ainsi pour 1 kWh d'énergie thermique primaire on obtient 0,3 kWh d'énergie électrique finale. Si ensuite on utilise cette électricité pour chauffer un immeuble, il est assez logique d'appliquer un facteur multiplicatif lorsque l'on compte en énergie primaire : donc 3 fois plus que l'énergie finale utilisée. Une conséquence est que, lorsque l'on compte en énergie finale, la consommation d'énergie fossile (charbon, pétrole,

<sup>5</sup><https://ourworldindata.org/fossil-fuels>.



gaz) en France est de 70% de l'énergie totale, alors qu'elle n'est que de 48% si l'on compte en énergie primaire.

Dans le cas de l'énergie nucléaire, les choses sont plus complexes et il a été décidé d'appliquer, arbitrairement, un facteur correspondant au rendement thermique des turbines, sans revenir à la véritable source « primaire » de l'énergie nucléaire qui serait la fission des noyaux atomiques. Ainsi, en France, l'énergie primaire électrique correspond en moyenne à 2,58 fois (par convention) l'énergie finale. Il faut réaliser que ce chiffre est conventionnel (surtout dans le cas du nucléaire) mais il est d'importance, quand il s'agit, par exemple, de calculer le DPE (Diagnostic de Performance Énergétique) d'un bâtiment.

Ceci explique la différence importante entre les poids comparés d'énergie fossile selon que l'on compte en énergie finale ou primaire. Avec cette convention, la consommation d'électricité en France correspond à 20% environ de l'énergie finale totale, mais à environ 38% de l'énergie primaire.

On peut tirer de l'ensemble des chiffres présentés quelques idées simples. Aujourd'hui, la consommation en énergie finale au niveau mondiale est de 84% en énergie fossile (70% pour la France). Nous sommes donc globalement encore dans une énergie très majoritairement d'origine fossile et donc carbonée (c'est-à-dire émettant du CO<sub>2</sub> en excès). Les temps caractéristiques d'évolution des consommations énergétiques sont de l'ordre de 30 à 40 ans. On voit donc que tous les discours expliquant que l'on vise d'ici 10–20 ans à une neutralité carbone par un changement profond de nos consommations énergétiques sont d'un optimisme extrême ou tout simplement irréalistes.

#### 4. Le rôle des énergies renouvelables

En ce qui concerne les énergies renouvelables, la montée en puissance de la production par ces énergies nouvelles n'a aucune raison d'être plus rapide que ce que nous avons vu dans le passé pour la montée en puissance des différentes énergies fossiles ou du nucléaire. En effet, il y a plusieurs problèmes technologiques à résoudre pour pouvoir remplacer quantitativement le système actuel largement dominé par les énergies fossiles, par de l'électricité d'origine renouvelable. Les trois grands postes de

consommation d'énergie sont : le chauffage des bâtiments, le transport et la production industrielle. Le remplacement massif d'énergie fossile ou de l'énergie électrique d'origine nucléaire par des énergies renouvelables demandera des adaptations fondamentales, à la fois des moyens de productions, mais aussi des moyens de distribution de ces énergies. Ceci n'est pas inenvisageable, mais sera forcément long et certainement pas en une ou deux dizaines d'années.

Examinons quelques-uns des défis à surmonter : tout d'abord, les transports. Ils consomment environ 1/3 de l'énergie primaire et utilisent très massivement les énergies fossiles (proche de 100%); dans ce cas, remplacer le pétrole par l'électricité, même si un début de solution est apparu avec la voiture électrique, est loin d'être simple (coût, autonomie, évolution du parc...). Pour les camions, les avions ou les bateaux, il n'existe pas aujourd'hui de solutions viables à une échéance de temps compatible avec une neutralité carbone d'ici à 20 ans. Pour ces moyens lourds, l'hydrogène pourrait être une solution, encore faut-il que sa production se fasse de façon décarbonée, avec un coût acceptable, et que les questions de sécurité (en particulier pour les avions) ne soient pas un obstacle infranchissable. Il reste la production de carburant liquide, identique au pétrole, mais avec une source de carbone renouvelable (biomasse). Dans ce cas là encore, si l'on prend en compte les quantités à produire ainsi que le coût, on est très loin d'avoir une solution acceptable.

Pour l'industrie, l'électricité est déjà une source importante d'énergie mais encore faut-il que sa production soit décarbonée (nucléaire ou renouvelable). De plus, les industries très énergivores (cimenteries, haut-fourneaux...) qui émettent de grandes quantités de CO<sub>2</sub> n'ont pas de solutions de remplacement viables à l'échelle de l'ensemble de la production. La possibilité de capter et de stocker le CO<sub>2</sub> lors de son émission par des usines est envisageable, mais cela demande d'utiliser l'oxygène et non l'air comme comburant et d'avoir des solutions de stockage géologique ayant fait leurs preuves. Nous n'en sommes encore qu'aux essais pilotes avec un surcoût important.

## 5. Le bâtiment, peut-être une cible privilégiée pour économiser l'énergie

En effet, l'utilisation de la géothermie, de la biomasse ou de l'électricité décarbonée peut être envisagée à condition d'investir massivement dans les changements de systèmes de chauffage.

A temps court, il est probable que le plus sûr moyen d'infléchir nos émissions de CO<sub>2</sub> consiste à diminuer la consommation énergétique, en particulier dans le bâtiment, car c'est le poste sur lequel on peut espérer le plus d'économie d'énergie.

Examinons maintenant de plus près la situation des dépenses énergétiques du bâtiment.

Avec une population mondiale de l'ordre de 7 milliards dont 56% d'habitants vivent dans les villes et le reste en milieu rural, le monde évolue face à des défis importants en termes de logements. Les projections des démographes pour 2050 n'envisagent pas moins de 10 milliards d'habitants dont 66% vivront en milieu urbain. Un rapide calcul nous permet de réaliser qu'entre 2010 et 2050, il faudra construire autant de bâtiments en ville que ce qui existe aujourd'hui. Il faudra donc doubler la capacité mondiale des villes sur la planète. Pour comprendre le rôle crucial des bâtiments dans les défis énergétiques et environnementaux qui nous attendent, il faut se rappeler qu'à ce jour, dans les pays occidentaux, le bâtiment est le pôle de consommation énergétique le plus important et l'un des plus gros pôles d'émission de CO<sub>2</sub>. Avec pour l'Europe, 42% de la consommation d'énergie (26% pour les transports et 32% pour l'industrie), cela correspond à presque la moitié de l'énergie que nous consommons, car cette énergie est utilisée pour chauffer ou refroidir les bâtiments dans lesquels nous vivons et travaillons.

Pour bien comprendre l'enjeu, il faut avoir en tête que la moyenne des bâtiments consomme environ de l'ordre de 320 kWhEP/m<sup>2</sup>/an (EP indique que le calcul est fait en énergie primaire, comme la réglementation le demande). Par comparaison, un bâtiment d'habitation neuf en France, construit selon la réglementation thermique en vigueur (la RT2012) doit consommer de l'ordre de 40 kWhEP/m<sup>2</sup>/an. La moyenne de consommation des bâtiments existants est donc presque dix fois plus grande que celle des bâtiments neufs.

On peut envisager une autre façon de voir la situation. Si nous ramenons la moyenne à

100 kWhEP/m<sup>2</sup>/an, cela permettrait d'économiser pratiquement la même quantité d'énergie que celle que nous consommons dans les transports.

Tous les gouvernements occidentaux ont conscience de cette situation et ils ont promulgué deux sortes de mesures : des réglementations thermiques pour les bâtiments neufs et des plans de rénovation des bâtiments anciens. Il faut en effet tenir compte du fait que, à cause du très faible taux de renouvellement des bâtiments anciens (de l'ordre de 1% par an), on ne peut pas compter sur les seules réglementations thermiques des bâtiments neufs pour améliorer la situation.

Plusieurs technologies permettent de diminuer le besoin d'énergie d'un bâtiment, en particulier l'isolation thermique. L'air immobilisé dans un matériau poreux léger est la technique la plus accessible pour isoler un bâtiment. L'objectif d'un matériau poreux consiste à empêcher la convection qui, en permettant à l'air de se mettre en mouvement, augmenterait fortement les échanges thermiques que l'on veut éviter. On peut ainsi utiliser des fibres légères enchevêtrées (laine de verre, laine de roche, laine de bois...) ou des mousses synthétiques (polyester, polyuréthane...). Compte tenu des exigences de plus en plus grandes liées à l'augmentation des performances des bâtiments, l'épaisseur des isolants dans les murs va en augmentant, pouvant atteindre 30 à 50 cm selon les climats. Si ces épaisseurs sont acceptables pour des bâtiments neufs, cela pose de plus en plus de problèmes pour la rénovation, en particulier, pour les isolations par l'intérieur, car de la surface habitable peut être perdue. Il est donc nécessaire de trouver des isolants plus performants permettant, pour des résistances thermiques équivalentes, d'atteindre des épaisseurs sensiblement plus faibles. Deux technologies peuvent être mise en œuvre : les isolants sous vide et les aérogels.

La première consiste à utiliser des isolants sous vide. Ils sont fabriqués en recouvrant des plaques de silice pyrogénée (silice très fine) d'un emballage constitué d'un film d'aluminium. Auparavant, on a retiré l'air des plaques et elles ont été refermées de façon étanche. De cette manière, on arrive à augmenter la performance d'un facteur 5 à 7 par rapport à un isolant classique.

La deuxième technologie fait intervenir des aérogels : ils sont fabriqués à partir de silice précipitée en formant des pores de très petite taille. Si la taille

des pores devient de l'ordre de grandeur du libre parcours moyen des molécules d'air (de l'ordre de la centaine de nanomètres), on a une diminution très forte de la conductivité thermique de l'air. Cet effet a été découvert par Martin Knudsen [Knudsen, 1934] en 1934 à l'université technique du Danemark. Cela permet, sans passer par le vide, d'avoir des matériaux très isolants améliorant la performance d'un facteur 2 environ par rapport à de l'air immobilisé.

Si l'amélioration de l'isolation des murs est nécessaire, elle n'est pas suffisante. Il faut aussi améliorer l'isolation des parois vitrées. Pour cela, l'apparition du double vitrage avec l'introduction d'un gaz (Argon, Xenon...) entre les parois a permis de faire des progrès notoires. Ce double vitrage est maintenant devenu la norme. D'autres progrès, plus récents, ont encore permis l'amélioration des performances. L'introduction d'un « coating », c'est à dire d'une série de couches très fines (quelques nanomètres) de matériaux conducteurs (l'argent le plus souvent) et de matériaux diélectriques, permet de transformer la vitre en véritable interféromètre laissant passer librement le rayonnement visible mais réfléchissant vers l'intérieur les infra-rouges (qui transportent une grande partie de l'énergie de radiation thermique). Ce verre « bas-émissif » permet encore d'économiser de l'énergie en hiver comme en été. Très récemment, sont arrivées des vitres dont la transparence peut être contrôlée par une différence de potentiel entre deux plaques de verre rendues conductrices. Ces vitres électrochromes sont des piles contenant des ions métalliques qui selon leur degré d'oxydation absorbent ou non la lumière.<sup>6</sup> Elles permettent de réguler l'entrée des radiations lumineuses dans le bâtiment diminuant ainsi les apports de chaleur et permettant une adaptation continue de la luminosité.

Indépendamment de l'amélioration des performances des parois, il est nécessaire de mesurer sur le bâtiment final l'effet de l'introduction de ces technologies. Si la physique du bâtiment permet de calculer assez précisément ce que l'on peut espérer des performances théoriques d'un bâtiment bien construit, il est étonnant de voir que peu de techniques de mesures globales ont été développées jusqu'ici. La performance de chacun des matériaux entrant dans une

construction est bien sûr mesurée et contrôlée, par contre, en comparaison, peu de contrôles de performance sont réalisés sur le bâtiment final. Une des raisons en est la difficulté relative de mettre au point des techniques rapides et légères de mesure. Depuis quelques années, de telles mesures sont apparues. Leur principe en est simple mais la mise en œuvre demande un peu d'astuces. Il s'agit de considérer un bâtiment comme un circuit électrique (composé d'au moins une résistance et un condensateur) et d'utiliser des méthodes de perturbation pour mesurer la résistance thermique et la capacité calorifique du bâtiment [Mangematin et al., 2012, Boisson and Bouchié, 2014].

## 6. Conclusions

Le bilan des liens entre énergie et impact sur le climat démontre clairement que les émissions de CO<sub>2</sub> provenant principalement de la production énergétique, il est nécessaire de jouer sur les deux tableaux : réduire notre consommation et décarboner la production énergétique. De ce point de vue, on peut se réjouir qu'au niveau mondial, depuis 1990, le rapport production énergétique divisé par le PIB a baissé de 30% environ ainsi que les émissions de CO<sub>2</sub> par habitant. Malheureusement, les PIB mondiaux ainsi que la population augmentent plus vite que ces baisses relatives, ce qui fait que loin de diminuer, la consommation énergétique mondiale et les émissions de CO<sub>2</sub> augmentent dans l'absolu. Pour la France, les objectifs de la stratégie bas carbone sont très ambitieux. Ils visent pour 2050 à une neutralité carbone du pays en baissant d'un facteur 6 les émissions et en compensant le reste par des puits de carbone. Ces objectifs sont d'autant plus ambitieux que le passé récent nous a montré que notre pays, comme d'ailleurs bien d'autres, s'était auparavant fixé des objectifs moins ambitieux et qu'il n'a pas pu les respecter.<sup>7</sup> On peut donc légitimement se poser la question du réalisme des ambitions de notre pays comme du reste du monde vis-à-vis du défi climatique.

<sup>6</sup>[https://en.wikipedia.org/wiki/Smart\\_glass](https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_glass).

<sup>7</sup><https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/suivi-strategie-nationale-bas-carbone>.

## Références

- Boisson, P. and Bouchié, R. (2014). ISABELE method : In-Situ Assessment of the Building Envelope Performances. In *9th International Conference on System Simulation in Buildings - SSB2014, Liege, Belgium*, pages 302–320. (P17). <http://orbi.ulg.ac.be/handle/2268/183783>.
- Knudsen, M. (1934). *Kinetic Theory of Gases*. Methuen & Co. Ltd., London.
- Mangematin, E., Pandraud, G., and Roux, D. (2012). Quick measurements of energy efficiency of buildings. *C. R. Phys.*, 13 :383–390.





---

Facing climate change, the range of possibilities / *Face au changement climatique, le champ des possibles*

## Les villes et le climat : Bâtiments et urbanisme

### *Cities and climate change : buildings and urban land use*

Vincent Viguié<sup>a</sup>

<sup>a</sup> CIRED – Centre International de Recherche sur l'Environnement et le Développement (UMR 8568 CNRS, EHESS, Ecole des Ponts ParisTech, AgroParisTech, CIRAD) Nogent-sur-Marne, France  
*Courriel*: [viguie@centre-cired.fr](mailto:viguie@centre-cired.fr)

**Résumé.** Les politiques urbaines et les modes de vie des citoyens sont un élément central de la question climatique. Nous vivons en effet dans un monde de plus en plus urbanisé, et les villes sont responsables de plus des deux tiers des consommations d'énergie mondiales. La manière dont sont conçus les bâtiments, et l'organisation spatiale des villes jouent un rôle fondamental sur ces consommations d'énergie et les émissions associées. Faire en sorte qu'elles soient cohérentes avec les enjeux environnementaux amène la plupart du temps de nombreux co-bénéfices vis-à-vis des autres enjeux (sociaux et économiques) auxquels sont confrontés les décideurs urbains. C'est ce qui explique que les villes soient globalement très actives sur la question du climat, même si les défis restent importants.

**Abstract.** Urban policies and city inhabitants behaviors are at the forefront of global environmental issues. We live indeed in an urbanizing world, and cities are responsible for approximately two third of global energy consumptions. How buildings are built, and how cities are organized are both key drivers of greenhouse gases emissions. Making them coherent with environmental constraints often lead to co-benefits with other urban issues such as economic competitiveness or social inclusiveness. This explains why cities are globally active concerning climate change, even if much still needs to be done.

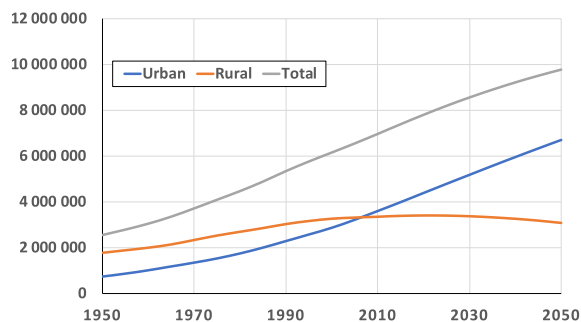
**Mots-clés.** Climat, Bâtiments, Transport, Forme urbaine, Démographie, Émissions de gaz à effet de serre.

**Keywords.** Climate, Buildings, Transport, Urban form, Demography, GHG emissions.

### 1. Les villes et le climat

Jusqu'au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, la quasi-totalité de la population humaine vivait dans les zones rurales. La situation a brusquement changé en Europe lors de la révolution industrielle, avec l'apparition d'une croissance rapide de la population des villes, phénomène qui a progressivement touché le reste du monde au fur et à mesure du XX<sup>ème</sup> siècle. Aujourd-

d'hui, fait sans précédent dans l'histoire, on estime qu'il y a sur la planète plus d'habitants dans les villes que dans les campagnes, et ce depuis une dizaine d'années environ (Figure 1). Les derniers chiffres publiés par les Nations Unies [UN, 2018] estiment ainsi qu'en 2018, 55.3% de la population mondiale vivait en ville, proportion qui pourrait atteindre 60% en



**FIGURE 1.** Évolution des populations urbaines et rurales mondiales. Les valeurs après 2018 sont des projections démographiques. Source : Nations Unies, World Urbanization Prospects (2018).

2030.<sup>1</sup> Quatre cinquième des Nord-Américains, plus de 90% des Belges, Uruguayens, Israéliens, Japonais ou Gabonais vivent en ville. La proportion d'urbains est plus faible dans les pays en développement, mais est proche de 52%, et en croissance constante.

Du fait de leur poids démographique, les villes sont responsables de la majorité des consommations mondiales d'énergie : de 67 à 76% de celles-ci [IPCC, 014d]. Certaines villes consomment autant d'énergie que des pays entiers. Londres, par exemple, avec une population aux alentours de 7.8 millions habitants, consomme à peu près autant d'énergie que l'Irlande (Source : Eurostat et UK department of energy and climate change).

On peut noter que la part de l'énergie mondiale consommée par les villes est plus importante que la part de la population mondiale qui y vit (67 à 76% comparé à 55%). Cela peut paraître contre-intuitif, car, dans les pays développés, en général, la consommation d'énergie par personne tend à être plus faible dans les villes que dans les campagnes, du fait d'une densité de peuplement plus importante qui permet des gains d'efficacité et limite les besoins en longs déplacements. Cependant, dans les pays en développement, c'est l'inverse qui se produit : la consommation d'énergie par personne est en général plus

élevée en ville qu'à la campagne. La raison en est que les urbains tendent à être plus riches et à avoir plus accès aux services consommant de l'énergie que les ruraux [IPCC, 014d]. Cet effet l'emporte en général face aux gains d'efficacité qui existent dans les pays en développement comme dans les pays développés. Un exemple extrême est donné par la Chine du milieu des années 2000, où la consommation d'énergie par personne dans les villes était de quasiment 80% plus élevée que la consommation moyenne dans le pays [IEA, 2008].<sup>2</sup> Plus des trois quarts de la population urbaine mondiale vivant dans un pays en développement, c'est cette tendance qui est observée en moyenne.

Les villes sont également des lieux importants lorsque l'on s'intéresse à notre vulnérabilité face au changement du climat, car ce sont des lieux de concentration extrême de la population. Elles ne couvrent que de 0.4 à 0.9% de la surface globale de la terre [Esch et al., 2017, Zhou et al., 2015] dans lesquels, rappelons-le, se concentrent plus de 50% de la population de la planète. Cela signifie que tout événement météorologique extrême touchant les espaces urbanisés peut avoir des répercussions considérables. Ceci est d'autant plus vrai que les villes ne sont pas réparties au hasard à la surface du globe. De nombreuses villes sont installées le long de cours d'eau ou de surfaces maritimes, du fait de l'important rôle historique joué par la navigation pour le commerce. Ces espaces sont particulièrement vulnérables à des catastrophes telles que les inondations [IPCC, 2014a].

La concentration d'habitants elle-même est un facteur de risque pour certains impacts du changement climatique, tels que la propagation des maladies, ou encore l'accroissement des canicules. Dans ce dernier cas, l'explication vient du fait que les villes génèrent un micro-climat, « l'effet d'îlot de chaleur urbain », qui augmente les températures (jusqu'à 7 degrés la nuit à Paris, voir Lemonsu et al. [2013] par exemple), et démultiplie l'impact sur la santé des vagues de chaleur. Cet effet est d'autant plus important que la ville est peuplée et dense [Lemonsu et al., 2015].

<sup>1</sup> Voir les chiffres de Nations-Unies <https://population.un.org/wup/>. Il faut noter que la définition de « urbain » et « rural » dépend du pays. En France, par exemple, un urbain est quelqu'un qui vit dans une commune de plus de 2,000 habitants et où les habitations sont séparés d'au plus 200 mètres. Au Royaume-Uni, il s'agit des habitants de municipalités de plus de 10,000 habitants.

<sup>2</sup> Autre exemple : au niveau mondial, 32% de la population rurale n'a pas accès à l'électricité, comparé à seulement 5.3% de la population urbaine [IPCC, 014d].

## 2. La fenêtre d'opportunités

Ces enjeux, tant ceux relatifs à la vulnérabilité face aux impacts du changement climatique, que ceux relatifs aux émissions de gaz à effet de serre, dépendent crucialement de la manière dont les villes sont construites. Il est important de noter que nous vivons actuellement ce que l'on appelle une « fenêtre d'opportunité » vis-à-vis de chacun d'entre eux.

Une fois une ville construite, il est en effet très difficile de revenir en arrière et d'adapter l'existant. Il est difficile de modifier les bâtiments tout d'abord, mais également les réseaux et encore plus le plan de la ville. Pour s'en convaincre, il suffit de regarder par exemple les *bastides* françaises, villes dont le tracé des rues reste approximativement le même que lors de leur fondation au Moyen Âge il y a plus de 700 ans... Les choses sont beaucoup plus simples lorsque l'on est en train de construire une ville, et que de nombreux choix d'aménagement et d'organisation s'offrent à nous. C'est à ce moment qu'est choisi ce à quoi va ressembler la ville pour les décennies, voire les siècles à venir. Or, le monde s'urbanise actuellement à une vitesse folle, et c'est maintenant que se décide si les villes qui sont construites sont et seront adaptées aux enjeux climatiques.

Les chiffres sont sans précédent dans l'histoire : non seulement la part de la population mondiale vivant en ville augmente, comme nous l'avons indiqué ci-dessus, mais la population mondiale est elle-même en forte croissance. La conjonction des deux conduit à une explosion du nombre d'urbains. Les Nations Unies estiment qu'en 2050, comparé à 2010, la population urbaine aura pratiquement doublé. En fait, la majorité de l'accroissement de population mondiale que l'on observe aura lieu en ville, la population rurale restant à peu près stable voire baissant en valeur absolue (voir par exemple la Figure 1). Tous les jours, en moyenne, il y a ainsi 220 000 urbains de plus dans le monde. C'est plus, pour chaque semaine, que l'équivalent de la population de Munich, ou de toute l'agglomération Lyonnaise. C'est l'équivalent de l'ensemble de l'île de France à construire tous les deux mois!

Cette croissance n'est d'ailleurs pas uniforme entre les villes. S'il est projeté que le nombre de mégapoles de plus de 15 millions d'habitants augmente, de 16 aujourd'hui à 24 en 2030, les deux tiers d'entre elles ne devraient voir cependant qu'une croissance

modeste de leur population (moins de 2% par an). L'essentiel de la croissance urbaine devrait avoir lieu dans les villes de taille moyenne ou petite, de moins de 1 million d'habitants, qui regroupent déjà plus de 60% de la population urbaine mondiale [UN, 2018].

## 3. Comment réduire les émissions des villes ?

Mesurer les émissions d'une ville est un exercice compliqué, et qui se heurte à deux obstacles majeurs [Hoornweg et al., 011a,b]. Tout d'abord, il n'y a pas de définition universellement acceptée des limites d'une ville, ce qui fait que les chiffres concernant des villes de différents pays peuvent correspondre à des réalités différentes.<sup>3</sup> Deuxièmement, la délimitation des activités qui doivent être prises en compte ne fait pas non plus consensus. En effet, il faut par exemple décider si la production d'électricité et les émissions associées sont la « responsabilité » de ceux qui la produisent, ou de ceux qui la consomment. Il en va de même pour les biens et les services achetés par les habitants : à qui faut-il attribuer les émissions associées à l'extraction des ressources, au transport et aux processus industriels qui sont nécessaires à leur production et à leur distribution ?

Des standards ont été proposés en vue d'harmoniser les réponses à ces questions, et plusieurs initiatives tentent d'établir des inventaires d'émissions comparables d'une ville à l'autre [C40, 2014, 2018, Hoornweg et al., 011a,b, IPCC, 014d, Nangini et al., 2019]. Leur principale conclusion est que, même rapportées au nombre d'habitants, les niveaux d'émissions de GES varient fortement d'une ville à l'autre. Une deuxième conclusion, importante, est que, même si les villes riches tendent à consommer plus d'énergie que les villes pauvres, et donc à émettre plus, pour des conditions climatiques similaires, il n'y a pas de relation inévitable entre richesse économique et niveau d'émission de GES. C'est particulièrement le cas si la comptabilité des émissions exclut la consommation des biens manufacturés par les habitants : les émissions dans ce cas peuvent être

<sup>3</sup>Par exemple, les chiffres concernant Paris se réfèrent généralement à Paris au sens administratif, c'est à dire à Paris *intra-muros*, alors que dans la plupart des villes, c'est l'agglomération en entier qui est considérée. L'agglomération urbaine correspondant à la ville de Paris correspond à peu près à l'ensemble de la région Île de France [Hassan, 2001].



très faibles dans certaines villes à la planification urbaine adaptée.

Pour comprendre quelles caractéristiques ou politiques permettent aux villes d'être sur une trajectoire bas-carbone, regardons plus en détail deux postes particulièrement importants des émissions urbaines : les émissions des bâtiments et du transport. Ces deux postes constituent par exemple, dans les villes européennes, les secteurs principaux sur lesquels se concentrent les stratégies municipales de baisse des émissions [Reckien et al., 2018].

#### 4. Bâtiments

En 2014, l'énergie pour les bâtiments résidentiels et commerciaux représentait 31% de l'énergie finale utilisée dans le monde et 54% de la demande en électricité. Cela correspondait à 23% des émissions de GES d'origine énergétique (dont un tiers via utilisation directe d'énergie fossile) [IEA, 2017, Masson-Delmotte et al., 2018]. Ces émissions proviennent de l'énergie utilisée pour le chauffage, la climatisation, la cuisine, et les divers équipements ménagers. Dans les pays à forte croissance urbaine, comme en Chine, il faut également y ajouter les émissions liées aux travaux de construction de nouveaux logements [Zhu et al., 2020].

Toutes ces émissions sont en augmentation. Du fait de l'augmentation de la population urbaine mondiale et du meilleur accès, dans les pays en développement, aux équipements ménagers, il est projeté que l'utilisation d'énergie dans les bâtiments puisse doubler ou tripler d'ici le milieu du XXI<sup>ème</sup> siècle [IPCC, 2014c]. Cependant, et c'est le point central dans ce secteur, il existe de nombreuses solutions technologiques, déjà bien établies, qui permettent de réduire très fortement la consommation d'énergie des bâtiments. On estime ainsi que la diffusion généralisée des pratiques de construction et des technologies les plus performantes actuelles permettrait d'éviter la hausse des consommations dont nous venons de parler, et même de *réduire* les consommations d'énergie dans les bâtiments par rapport à aujourd'hui, malgré l'augmentation de la population mondiale et la croissance des villes [IPCC, 2014c].

L'enjeu majeur dans ce secteur est donc de réussir à diffuser ces techniques, et de comprendre où se situent les barrières à cette diffusion. C'est une question complexe, car, en général, ce n'est pas le coût qui

pose problème : dans la plupart des cas, réduire les consommations d'énergie des bâtiments est rentable au bout de quelques années grâce aux économies d'énergie effectuées. Les barrières se situent plutôt au niveau de questions liées au manque d'information, au manque d'incitation, au manque de fonds pour financer l'installation initiale des équipements, ou encore à des politiques de subvention du prix de l'énergie, qui supprime tout avantage financier à économiser ses consommations d'énergie.

Prenons deux exemples de barrières que l'on peut observer en France (et dans de nombreux pays développés) [Giraudet, 2011]. Premier exemple : Personne n'a intérêt à isoler un logement qui est mis en location. En effet, le coût des travaux incombe au propriétaire, tandis que les économies d'énergie vont au locataire. La bonne prise en compte dans le prix des loyers du niveau d'isolation des logements serait un des moyens de lutter contre ce phénomène. L'état tente de le promouvoir en obligeant notamment à joindre un diagnostic de performance énergétique aux contrats de location, de manière à informer les locataires. Deuxième exemple [Giraudet and Houde, 2014] : les travaux d'isolation d'un logement nécessitent un investissement (un surcoût), et, comme nous l'avons dit, sont souvent rentables après quelques temps via les économies réalisées. Cependant, si on s'aperçoit au bout de quelques années que les travaux ont été mal faits, l'équation change complètement, et la situation n'est plus du tout rentable pour la personne qui a payé des travaux sans obtenir les économies espérées. Il existe donc un *risque* qui peut freiner la demande pour les travaux d'isolation. Les politiques de certification des entreprises et des artisans sont un exemple de dispositifs mis en place pour essayer de surmonter cette barrière.

Un autre enjeu dans le secteur du bâtiment est, au-delà des technologies, le rôle central joué par les comportements et les modes de vie. Faire attention à sa consommation d'énergie dans la vie quotidienne peut permettre de réduire ses consommations de quasiment un facteur 2 [IPCC, 2014c]. Ce que l'on nomme « l'effet rebond » est une bonne illustration du rôle joué par les comportements [Sorrell et al., 2009] : on observe en général que, lorsqu'un logement est isolé, les habitants en profitent pour plus chauffer (maintenir des températures plus chaudes) qu'auparavant. Ce comportement est logique, vu que

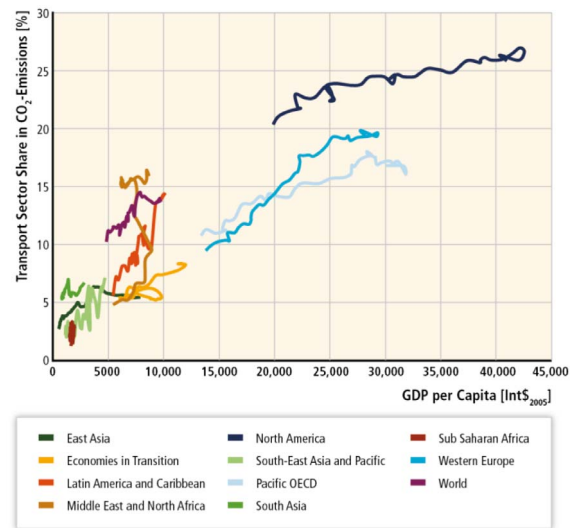
chauffer leur coût moins cher qu'avant, mais il annule une certaine part des économies d'énergie espérées. Ce phénomène, qui est beaucoup étudié et bien quantifié, et est aujourd'hui pris en compte statistiquement dans la planification énergétique nationale et la mise en place de politiques d'isolation des bâtiments.

Un autre enjeu notable, est la difficulté posée au secteur du bâtiment par les effets du changement climatique lui-même. En changeant les températures, celui-ci va en effet changer à l'avenir les besoins de chauffage et de climatisation, rendant plus complexe la conception de bâtiments prévus pour durer plusieurs décennies [De Cian and Wing, 2019, Halle-gatte et al., 2007]. Tout l'enjeu est notamment de réussir à éviter un recours massif à la climatisation dans quelques années, ce qui conduirait à un cercle vicieux dans lequel le réchauffement du climat lui-même amènerait à plus d'émissions de GES [Viguié et al., 2020].

## 5. Transports

Les transports jouent un rôle particulièrement important en ville, pour les mouvements des biens et de la population. Le secteur des transports représentait en 2014 dans le monde environ 28% des consommations d'énergie, et 23% des émissions liées à l'énergie [IEA, 2017, Masson-Delmotte et al., 2018]. C'est un secteur dans lequel la consommation de pétrole est particulièrement intense : plus de 90% de l'énergie utilisée pour les transports provient du pétrole, ce qui fait que ce secteur représente à lui seul près des deux tiers (65%) de la demande en pétrole mondiale. On estime que près de 40% de la demande mondiale d'énergie concerne le transport urbain [IEA, 2013].

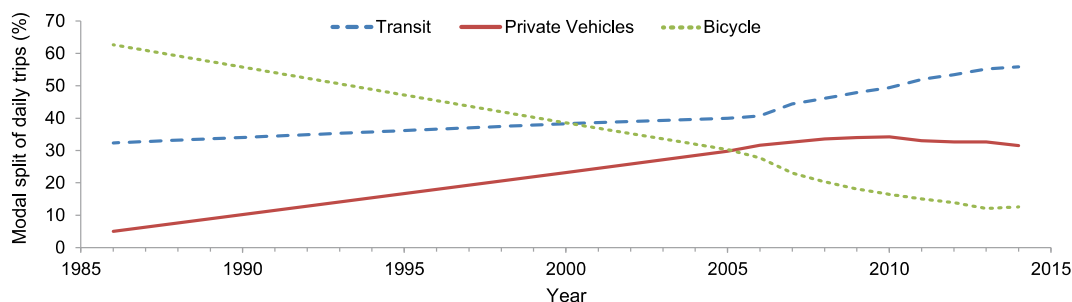
Les émissions liées aux transports sont très inégalement réparties à travers le monde : même en faisant abstraction du transport aérien, 10% de la population mondiale est à l'origine de près de 80% de la mobilité motorisée totale (exprimée en passager.km), tandis que la plupart de la population ne voyage quasiment jamais de manière motorisée [IPCC, 2014b]. Les émissions liées aux transports sont aujourd'hui dominées par les pays développés, même si ces dernières années une croissance rapide a été observée en Asie, tant pour la mobilité en voiture que pour celle en véhicules légers à 2 ou 3 roues, qui ont



**FIGURE 2.** Part relative des émissions de GES dues aux transports en fonction du PIB par habitant, pour différentes régions du monde de 1970 à 2010. Source : IPCC [2014b].

toutes les deux fait plus que doubler (exprimées en passagers.km) entre 2000 et 2010.

Il a existé jusqu'à aujourd'hui un lien fort entre la croissance économique et le développement de ces transports motorisés : plus un pays est développé, plus la part des déplacements qui y est faite en véhicule à moteur, et notamment en voiture, tend à être importante [IPCC, 2014b]. Cela explique que les émissions de ce secteur ont fortement crû ces dernières années, de 2.5% par an en moyenne entre 2010 et 2015, soit plus que dans n'importe quel autre secteur, avec la croissance économique des pays en développement. Ceci est illustré par exemple par la Figure 2, dans laquelle on peut voir l'augmentation tendancielle, de 1970 à 2010, de la part du secteur des transports dans les émissions, au fur et à mesure de la croissance économique. Réduire les émissions associées aux transports passe, comme pour le secteur du bâtiment, par la diffusion de technologies moins émettrices, comme par exemple des véhicules électriques. Cependant, il faut noter que, dans ce secteur, il ne s'agit là que d'un aspect de la question, l'autre aspect, essentiel, étant les choix d'infrastructures de transport et d'aménagement. Ces choix sont en effet déterminants sur les distances parcourues et sur les modes de transports utilisés.



**FIGURE 3.** The modal split data in Beijing between 1986 and 2014. Source : IPCC (2018), à partir de Gao and Newman [2018].

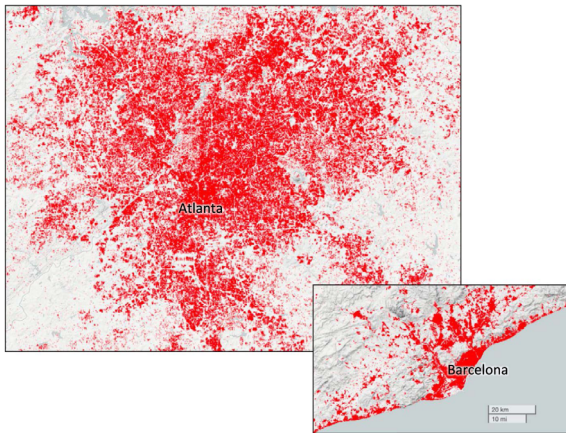
La Figure 2 illustre également ces idées. En effet, il n'existe pas une trajectoire unique que suivraient les pays. La comparaison des trajectoires de l'Amérique du Nord (bleu foncé) avec celles de l'Europe et des pays de l'OCDE de la zone Pacifique (Japon, Corée, Australie, Nouvelle-Zélande), montre que, pour un niveau de PIB par personne similaire, ces zones ont des niveaux d'émissions dues aux transports très différents. Cela est dû en grande partie à des politiques d'infrastructures, un aménagement du territoire et à des choix d'urbanisme très différents. Savoir quelle trajectoire vont suivre les pays en développement est une question cruciale pour le climat.

Si le lien entre croissance du PIB et croissance de la mobilité motorisée a été valable depuis plusieurs décennies, on commence aujourd'hui à observer les premiers signes d'un *découplage* entre eux [Masson-Delmotte et al., 2018]. Dans plusieurs villes de pays développés, l'utilisation de la voiture est en baisse, remplacée par les transports en commun, beaucoup moins émetteurs, les véhicules électriques ou les modes non-motorisés. Des évolutions similaires apparaissent également dans des villes d'Amérique Latine et de Chine. La Figure 3 présente ainsi l'évolution des parts modales de la voiture, du vélo et des transports en commun à Beijing de 1986 à 2014. L'utilisation de la voiture, d'abord en croissance, a commencé à baisser autour des années 2010, remplacée par les transports en commun. Plusieurs facteurs expliquent ce découplage, dans les villes dans lesquelles il a lieu : développement de nouveaux transports en commun, apparition de nouveaux modes de transport tels que les vélos électriques, et politiques d'urbanisme pour maximiser l'utilisation des transports en commun

ou des modes doux (marche, vélo...).

Les politiques d'urbanisme jouent un rôle fondamental sur les distances parcourues et le choix du mode de transport [IPCC, 014d]. Favoriser la mixité des usages (emplois et logements mélangés dans les quartiers) et aménager les rues pour favoriser les modes doux (marche, vélo) sont des exemples de pratiques ayant un impact positif sur les émissions liées aux transports. À l'échelle des agglomérations, la densité urbaine joue également un rôle important. En réduisant la distance des déplacements et en permettant de développer plus simplement des réseaux de transport en commun, cette densité joue un rôle essentiel.

Les exemples en sont nombreux. Le cas de Barcelone et Atlanta est assez illustratif [Bertraud and Richardson, 2004] : ce sont deux villes qui ont à peu près la même population (5.3 millions à Atlanta et 5 millions à Barcelone, lorsque l'on considère les agglomérations) et sont situées dans des pays développés. En revanche, comme on peut le voir Figure 4, elles n'ont pas du tout été construites de la même manière, Barcelone étant beaucoup plus dense qu'Atlanta, qui est 11 fois plus étendue. Cette différence est notamment due à des raisons historiques, Barcelone ayant été construite en grande partie au XIX<sup>ème</sup> siècle, à une époque où la norme était les déplacements à pieds, alors qu'Atlanta s'est principalement développée au XX<sup>ème</sup> siècle, à une époque où la norme était les déplacements en voiture. Par personne, les émissions liées au transport sont de l'ordre de 6.9 tCO<sub>2</sub>/an à Atlanta, et de 1.16 tCO<sub>2</sub>/an à Barcelone, soit 6 fois plus faibles (source : LSE Cities). Les deux raisons principales sont celles que nous avons évoquées ci-dessus : d'une part les



**FIGURE 4.** Aires urbanisées d'Atlanta et de Barcelone représentées à la même échelle en 2015. Données : Copernicus Global Land Service : Land Cover 100 m © Copernicus Service Information 2020.

distances à parcourir à Barcelone sont généralement plus faibles qu'à Atlanta, et d'autre part les transports en commun y assurent une grande part des déplacements. Le métro de Barcelone mesure 99 km de long, et 60% de la population de la ville vit à moins de 600 m d'une des 136 stations de métro. Pour obtenir la même accessibilité aux transports en commun à Atlanta, il faudrait au minimum 3400 km de lignes de métro et 2800 stations, ce qui serait un investissement considérable [Bertraud and Richardson, 2004].

La question de la densité des villes illustre cependant aussi toute la complexité des politiques d'aménagement urbain. En effet, au-delà des questions de transport, une ville dense présente de nombreux avantages (limitation de l'artificialisation des terres agricoles), mais aussi de nombreux défauts [Lohrey and Creutzig, 2015] : exposition accrue aux nuisances (bruit, et, potentiellement, pollution de l'air), faible présence d'espaces verts au sein de la ville, effet d'îlot de chaleur urbain accru, et donc vulnérabilité accrue aux canicules etc. La recherche reste active sur comment concilier tous ces enjeux (voir par exemple OECD, 2018; Pierer and Creutzig, 2019).

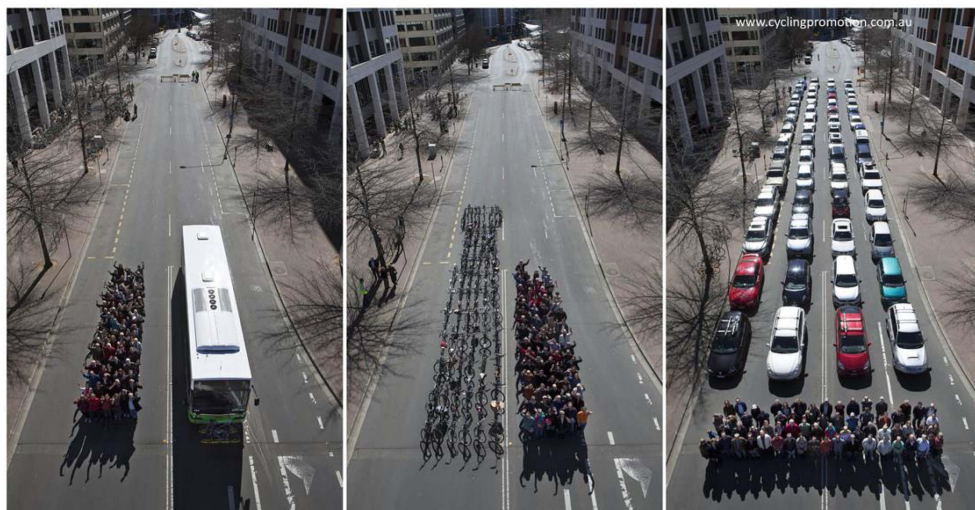
## 6. Enjeux et défis des politiques climatiques urbaines

La question dont nous venons de parler est en fait plus générale : les politiques urbaines qui concernent

les enjeux climatiques ne sont jamais décidées dans le vide. Les gestionnaires d'une ville doivent, au-delà des questions environnementales, s'occuper de nombreux autres enjeux très divers (compétitivité économique, questions sociales, logements, etc.) qui interagissent avec ceux-ci, et parfois s'y opposent. Cependant, il faut noter que dans une très grande part des cas, les mesures permettant de réduire les émissions des villes sont plutôt des mesures qui ont des co-bénéfices positifs. L'exemple le plus emblématique est la question de la pollution de l'air. Isoler les bâtiments et donc réduire le chauffage au fioul ou au charbon, promouvoir des véhicules plus efficaces, les modes doux et les transports en commun, sont autant de politiques qui ont un impact direct sur la qualité de l'air extérieur [Masson-Delmotte et al., 2018]. Dans de nombreux pays en développement, la qualité de l'air à l'intérieur des logements est également un enjeu de santé publique prioritaire. Le fait de passer de chauffages et de cuisinières à bois, charbon ou paraffine vers des appareils plus modernes électriques ou au gaz permet à la fois de réduire les émissions de gaz à effet de serre et d'améliorer grandement la qualité de l'air intérieur.

Un autre exemple est la congestion des transports. Les déplacements en voiture individuelle sont très consommateurs d'espace sur la route, pour faire circuler les véhicules et pour les stationner. La Figure 5 illustre ainsi la place prise sur la chaussée pour déplacer le même nombre de personnes, en bus, en vélos et en voitures. Faire se déplacer les personnes en transport en commun ou en vélo permet d'en déplacer beaucoup plus sur la même portion de route, et donc de faire chuter la congestion.

Ces questions sont importantes, car elles expliquent que la situation, lorsque l'on veut faire diminuer les émissions de GES, se pose de manière très différente au niveau des états ou des villes [Ostrom, 2010]. Au niveau des états, réduire les émissions est souvent vu comme entraînant des pertes de compétitivité, ce qui induit des réticences à agir si les autres états ne le font pas également. En revanche, au niveau des villes, réduire les émissions est au contraire souvent vu comme améliorant la qualité de vie des habitants et l'attractivité de la ville. Cela entraîne que les villes et les collectivités locales sont généralement beaucoup plus enclines à agir pour réduire les émissions que les pays dans lesquels elles sont situées [Rosenzweig et al., 2010].



**FIGURE 5.** Place prise sur la chaussée pour déplacer le même nombre de personnes, en bus, en vélos et en voitures. Photo prise par l'ONG australienne Cycling Promotion Fund ©Cycling Promotion Fund.

Des projets essaient de quantifier l'impact de ces actions. Aux Etats-Unis, par exemple, le projet « America's Pledge » [Bloomberg Philanthropies, 2019] estime que, malgré la sortie du pays de l'accord de Paris, il existe beaucoup d'acteurs locaux qui se sont engagés en faveur de réductions d'émissions qui entrent dans le cadre des objectifs de l'accord de Paris, et qu'ils représentent au moins 51% des émissions américaines et 65% de la population. En Europe, il a été monté récemment que, sur un échantillon représentatif de 885 villes, plus des deux tiers ont mis en place une stratégie des réductions des émissions [Reckien et al., 2018]. De nombreux réseaux ont été constitués par des villes, indépendamment des états, pour leur permettre de mutualiser les connaissances et les compétences (par exemple ICLEI, C40, le Covenant of Mayors, etc.). Tout ceci est enfin une des raisons qui explique la création au sein des négociations internationales du NAZCA (Non-State Actor Zone for Climate Action, UNFCCC, 2019), qui recense les actions au niveau local dans chaque pays, dans le but notamment d'avoir une vision plus juste des efforts internationaux de réduction des émissions que les simples politiques nationales.

## 7. Conclusion

En conclusion, parce qu'elles concentrent plus de la moitié de la population et l'essentiel de l'activité économique mondiale, les villes sont des acteurs majeurs des problématiques environnementales globales. Les politiques de transport, d'urbanisme et de logement sont des moyens nécessaires et efficaces d'action pour réduire les émissions de GES de la planète. Cela est particulièrement vrai en ce moment, car le monde vit une urbanisation massive, et les choix qui vont être faits pour les villes qui se construisent actuellement vont nous engager pour les décennies à venir. Réduire les consommations d'énergie et les émissions de GES en ville n'est pas simple, car cela interagit avec de nombreux autres enjeux, environnementaux, mais aussi économiques et sociaux. Cependant, des synergies entre ces enjeux sont très souvent présentes.

## Références

Bertraud, A. and Richardson, H. W. (2004). Transit and density : Atlanta, the United States and Western Europe. In *Urban Sprawl in Western Europe and the United States*, pages 293–310. Ashgate, London.



- Bloomberg Philanthropies (2019). Accelerating america's pledge : Going all-in to build a prosperous, low-carbon economy for the united states.
- C40 (2014). The global protocol for community-scale greenhouse gas emission inventories (gpc). Implementation Guides.
- C40 (2018). Consumption-based ghg emissions of c40 cities. C40 report.
- De Cian, E. and Wing, I. S. (2019). Global energy consumption in a warming climate. *Environ. Res. Econ.*, 72(2) :365–410.
- Esch, T., Heldens, W., Hirner, A., Keil, M., Marconcini, M., Roth, A., Zeidler, J., Dech, S., and Strano, E. (2017). Breaking new ground in mapping human settlements from space—the global urban footprint. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, 134 :30–42.
- Gao, Y. and Newman, P. (2018). Beijing's peak car transition : hope for emerging cities in the 1.5 °C agenda. *Urban Plan.*, 3(2) :82–93.
- Giraudet, L.-G. (2011). *Les Instruments Économiques de Maîtrise de l'énergie : Une Évaluation Multidimensionnelle*. PhD thesis, Paris Est.
- Giraudet, L.-G. and Houde, S. (2014). Double moral hazard and the energy efficiency gap. *Evidence for Action on Energy and Efficiency (E2e) Working Paper 9*.
- Hallegette, S., Hourcade, J. C., and Ambrosi, P. (2007). Using climate analogues for assessing climate change economic impacts in urban areas. *Clim. Change*, 82(1) :47–60.
- Hassan, M. E. (2001). 99% des franciliens vivent dans l'aire urbaine de paris. *INSEE, Île-de-France à La Page no 196*.
- Hoornweg, D., Freire, M., Lee, M. J., Bhada-Tata, P., and Yue, B. (2011b). *Cities and Climate Change : Responding to an Urgent Agenda : Main Report*. Urban Development Series. World Bank Publications, Washington, D.C.
- Hoornweg, D., Sugar, L., and Trejos Gomez, C. L. (2011a). Cities and greenhouse gas emissions : moving forward. *Environ. Urbanization*, 23(1) :20727.
- IEA (2008). World energy outlook 2008. Organization for Economic. <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2008/weo2008.pdf>.
- IEA (2013). *Policy Pathways : A Tale of Renewed Cities*. Organization for Economic, Paris, France.
- IEA (2017). Energy technology perspectives 2017 : Catalysing energy technology transformations. IEA/OECD Paris.
- IPCC (2014a). Chapter 8 : urban areas. In Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach, K. J., Mastrandrea, M. D., Bilir, T. E., Chatterjee, M., Ebi, K. L., Estrada, Y. O., Genova, R. C., Girma, B., Kissel, E. S., Levy, A. N., MacCracken, S., Mastrandrea, P. R., and White, L. L., editors, *Climate Change 2014 : Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A : Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2014b). Chapter 8 : transport. In *Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change : Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (2014c). Chapter 9 : buildings. In *Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change : Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (2014d). Chapter 12 : human settlements, infrastructure and spatial planning. In *Climate Change 2014 : Mitigation of Climate Change : Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Lemonsu, A., Kounkou-Arnaud, R., Desplat, J., Salagnac, J.-L., and Masson, V. (2013). Evolution of the parisian urban climate under a global changing climate. *Clim. Change*, 116(3-4) :679–692.
- Lemonsu, A., Viguié, V., Daniel, M., and Masson, V. (2015). Vulnerability to heat waves : impact of urban expansion scenarios on urban heat island and heat stress in Paris (France). *Urban Clim.*, 14 :586–605.
- Lohrey, S. and Creutzig, F. (2015). A 'sustainability window' of urban form. *Transportation Research Part D : Transport and Environment*, October.
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., and Pidcock, R. (2018). Global warming of 1.5 °C : An ipcc special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening

- the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. Edited by IPCC. World Meteorological Organization Geneva, Switzerland.
- Nangini, C., Peregon, A., Ciais, P., Weddige, U., Vogel, F., Wang, J., Bréon, F. M., et al. (2019). A global dataset of CO<sub>2</sub> emissions and ancillary data related to emissions for 343 cities. *Scientific Data*, 6(January).
- OECD (2018). Rethinking urban sprawl.
- Ostrom, E. (2010). Polycentric systems for coping with collective action and global environmental change. *Glob. Environ. Change*, 20(4) :550–557. 20th Anniversary Special Issue.
- Pierer, C. and Creutzig, F. (2019). Star-shaped cities alleviate trade-off between climate change mitigation and adaptation. *Environ. Res. Lett.*, 14(8).
- Reckien, D., Salvia, M., Heidrich, O., Church, J. M., Pietrapertosa, F., De Gregorio-Hurtado, S., Valentina D'Alonzo, V., et al. (2018). How are cities planning to respond to climate change? Assessment of local climate plans from 885 cities in the EU-28. *J. Cleaner Prod.*, 191(August) :207–219.
- Rosenzweig, C., Solecki, W., Hammer, S. A., and Mehrotra, S. (2010). Cities lead the way in climate-change action. *Nature*, 467(7318) :909–911.
- Sorrell, S., Dimitropoulos, J., and Sommerville, M. (2009). Empirical estimates of the direct rebound effect : a review. *Energy Policy*, 37(4) :1356–1371.
- UN (2018). World urbanization prospects : The 2018 revision. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division.
- UNFCCC (2019). Nazca, the global climate action portal. 2019.
- Vigié, V., Lemonsu, A., Hallegatte, S., Beaulant, A.-L., Marchadier, C., Masson, V., Pigeon, G., and Salagnac, J.-L. (2020). Early adaptation to heat waves and future reduction of air-conditioning energy use in Paris. *Environ. Res. Lett.*, 15(7).
- Zhou, Y., Smith, S. J., Zhao, K., Imhoff, M., Thomson, A., Bond-Lamberty, B., seAsrar, G. R., Zhang, X., He, C., and Elvidge, C. D. (2015). A global map of urban extent from nightlights. *Environ. Res. Lett.*, 10(5) :054011.
- Zhu, W., Wei Feng, W., Li, X., and Zhang, Z. (2020). Analysis of the embodied carbon dioxide in the building sector : a case of China. *J. Cleaner Prod.*, 269 :122438.





networks, storage capacities and the flexibility of the energy mix. The question of the cost of nuclear power can be addressed within the framework of this global approach only.

**Mots-clés.** Énergie nucléaire, Climat, Cycle du combustible, Démantèlement, Irradiation, Déchets nucléaires, Empreinte CO<sub>2</sub>.

**Keywords.** Nuclear energy, Climate, Nuclear fuel cycle, Decommissioning, Irradiation, Nuclear waste, CO<sub>2</sub> footprint.

## 1. Introduction

Le Groupement international d'experts sur le climat (le GIEC est une émanation de l'Organisation des Nations unies) confirme dans son nouveau rapport du 6 octobre 2018 (le fameux « résumé pour les décideurs ») que le nucléaire fait partie de la solution pour limiter le réchauffement climatique. Il l'avait déjà écrit dans son précédent rapport présenté le 27 septembre 2014.

La prévalence dans le *mix* électrique français de l'énergie nucléaire nous positionne comme un excellent élève en termes d'électricité décarbonée (Tableau 1).

Pourtant, 69% des Français croient que les centrales nucléaires émettent du CO<sub>2</sub>. Un état responsable doit commencer par informer les citoyens, et devrait corriger cette perception erronée. Jamais le Ministère de l'environnement n'a dit que le nucléaire n'émettait pratiquement pas de CO<sub>2</sub>, et, récemment encore, la Ministre de l'environnement annonçait que l'état luttait contre le réchauffement climatique en fermant une centrale à Charbon, ... et la centrale nucléaire de Fessenheim! Pourtant les chiffres sont là, ils sont têtus, ils sont connus : l'intensité CO<sub>2</sub> des différentes sources d'électricité (Tableau 2) est pour le nucléaire de 16g/kWh, comparable à l'éolien (15) et à la biomasse (18), inférieur au solaire (22 à 48), et très inférieur au gaz (491), au pétrole (840) et au charbon (1024).

Il n'est pas nécessaire d'être grand clerc pour comprendre que, pour ce qui est de la diminution des émissions de CO<sub>2</sub>, cela n'a aucun sens de remplacer l'électricité nucléaire par une électricité issue du photovoltaïque ou éolienne, et que le recours au gaz ou au charbon tel qu'on le fait en Allemagne pour stabiliser les réseaux électriques mis en péril par l'intermittence, est une cause d'augmentation des émissions de CO<sub>2</sub>.

On ne construit jamais solidement sur le mensonge. On peut décider de « sortir du nucléaire » pour diverses raisons, essentiellement d'ordre politique, mais on ne peut pas dire qu'on le fait au nom de la lutte contre le réchauffement climatique.

**TABLEAU 1.** Emissions de CO<sub>2</sub> par habitant, toutes activités confondues pour les pays du G7 et la Chine

Pays	CO <sub>2</sub> /hab (en tonnes)
France	4,32
Italie	5,29
UK	6
Allemagne	8,82
Japon	9,35
USA	15,57
Canada	15,7
Chine	6,59

Dans une première partie, nous nous attacherons à rétablir quelques faits scientifiques que des décennies de propagande antinucléaire ont contribué à occulter dans le grand public, dans les media, et dans la classe politique. Nous commencerons par rappeler le principe de fonctionnement des centrales électro-nucléaires, les risques qu'elles comportent, la question du cycle du combustible qui est essentielle dans la gestion des ressources et des déchets, et la question du démantèlement des centrales. Dans chacune de ces questions circulent des contrevérités qu'il importe de dénoncer, pour que les choix à faire le soient en connaissance de cause.

Dans une seconde partie, nous aborderons les questions « systémiques » d'emprise au sol, de bilan matière, de coexistence entre les différentes sources d'électricité, et la question du coût intégré.

## 2. Rétablir la vérité scientifique

### 2.1. Le fonctionnement des centrales nucléaires et les risques associés

Le principe de génération de l'énergie nucléaire est simple : un élément radioactif fissile naturel (l'isotope 235 de l'Uranium dans les centrales de la filière Uranium) peut se scinder en deux fragments de masse atomique plus faible et en émettant deux

**TABLEAU 2.** Emissions de CO<sub>2</sub> selon la technologie de production d'électricité. Résultats obtenus dans le cadre du programme Externe de l'UE (Berger A. *et al.*, Int. J. Global Energy Issues, Vol. 40, Nos. 1/2, 2017)

Technique	Charbon	Gaz	Hydro	Eolien	Solaire	Nucléaire
gCO <sub>2</sub> /kWh	1024	491	6	15	45	16

**TABLEAU 3.** Nombre de décès calculé pour la production de 1000 TWh (deux fois la consommation annuelle française) à partir des données observées pour différentes techniques de production d'électricité (Berger A. *et al.*, Int. J. Global Energy Issues, Vol. 40, Nos. 1/2, 2017)

Technique	Charbon	Pétrole	Gaz	Biomasse	PV	éolien	hydro	Nucléaire
Décès/1000TWh	170000	36000	4000	24000	440	150	1400	90

à trois neutrons, qui a leur tour peuvent fissionner d'autres atomes : c'est le principe de la réaction en chaîne. La somme des masses atomiques des produits de fission est plus faible que celle du noyau fissile initial, et le « défaut de masse » est transformé en énergie, principalement en chaleur. Cette chaleur chauffe un fluide « caloporteur » qui va permettre de produire de la vapeur et de faire tourner des turbines qui produisent de l'électricité. Pour que ces réactions « en chaîne » puissent s'entretenir, il faut à la fois augmenter la quantité de noyaux fissiles par unité de volume (« enrichir l'uranium ») et contrôler la vitesse et la quantité de neutrons susceptibles de propager la fission (c'est le rôle respectivement du « modérateur » et des « barres de contrôle »). La variété des combustibles, des modérateurs et des fluides caloporteurs conduit à différentes « filières » qui chacune ont leurs inconvénients et leurs avantages, et chacune correspondent à des options technologiques adaptées. Pour cette raison, on ne peut pas penser séparément une filière de réacteurs et une filière de fabrication des combustibles.

La filière de très loin la plus répandue à la surface du globe est la filière dite REP (Réacteurs à Eau Pressurisée) : l'eau sert à la fois de modérateur et de caloporteur. Elle est sous pression, de façon à avoir une température de l'eau liquide aux alentours de 350 °C qui permet, à travers des générateurs de vapeur, de faire tourner les turbines électrogènes avec un meilleur rendement énergétique. Cette filière permet aussi de séparer le circuit primaire dont l'eau passe au cœur du réacteur, du circuit secondaire qui alimentera les turbines.

Le fantasme classiquement entretenu est qu'un réacteur nucléaire peut se transformer en bombe

atomique. C'est tout simplement faux : un cœur de réacteur nucléaire de 900 MW tel que ceux que nous avons en France contient 74 tonnes d'Uranium faiblement enrichi (3%) en Uranium 235. On est très loin de la masse critique pouvant conduire à un emballement de la réaction en chaîne : un atome d'Uranium ne peut entraîner la fission que d'un atome d'uranium, pas de plusieurs (ce qui est lié au nombre d'interactions possibles des neutrons avec les atomes avant leur élimination aux surfaces). Toute la simplicité réside dans cette « économie de neutrons ». Parfois, un atome d'Uranium absorbe un neutron pour donner un atome de Plutonium, mais cela ne se produit que dans 1% des cas de collisions neutron-atome d'Uranium 235. En cas d'accident grave, on ne peut tout simplement pas « concentrer les espèces fissiles » (Uranium 235 et Plutonium) et la transformation d'une centrale nucléaire en bombe nucléaire est une pure absurdité.

Si un tel risque est impossible, il n'en reste pas moins vrai que le nucléaire est une technologie exigeante et que les accidents sont possibles. Les accidents de Windscale (UK), Tchernobyl, Fukushima ont conduit à des explosions et à des incendies, mais ce sont des causes thermochimiques et non une explosion atomique. La gravité de ces accidents se mesure en fonction de l'émission de radionucléides dans l'atmosphère. C'est pour cela que les réacteurs actuels prévoient des enceintes de confinement pour éviter la dispersion des produits radioactifs.

Le goût du sensationnel, avec une bonne dose de mauvaise foi, a conduit à afficher des nombres de morts pharamineux. Là encore, les faits sont têtus et avérés, validés par l'Agence Internationale de l'Energie (qui a un fonctionnement semblable à ce-

lui du GIEC) et par l'OMS. L'accident de Windscale au Royaume-Uni a fait zéro mort, l'accident de Three Mile Island aux USA zéro mort, l'accident de Tchernobyl en Russie 4000 morts et l'accident de Fukushima zéro mort. Comme cela ne convenait pas à l'idéologie antinucléaire dominante, on a progressivement attribué à l'accident de Fukushima les morts du Tsunami (20 000) et on a gonflé au-delà de toute vraisemblance les morts induites par irradiation.

Même en supposant valide la « loi linéaire sans seuil » d'effet de la radioactivité sur l'homme, qui attribue un nombre de morts proportionnel à la dose d'irradiation reçue, et qui est probablement une sur-estimation, le nombre de morts par TWh d'électricité produite reste très faible, comparé au gaz, au pétrole et au charbon (Tableau 3). Si on prend comme indicateur le nombre de maladies graves induites (voir par exemple A. Markandy, P. Wilkinson, *The Lancet*, (2007), 370, 9591, pp. 979–990 « electricity generation and Health ») on a des résultats tout à fait similaires.

Les déboires de l'industrie électronucléaire française ont défrayé la chronique (les problèmes de mal-façonnage aux forges du Creusot, des soudures sur le site de Flamanville, des ségrégations carbone, etc.). Il ne faut pas minimiser ces problèmes : ils sont le signe d'une réelle perte de compétence en France tout simplement liée au fait qu'on n'a pas construit de centrales pendant 20 ans. Aucune industrie ne sortirait indemne d'une telle cure d'austérité. Aucune industrie ne pourrait vivre avec l'évolution constante et sans justification technique des réglementations, dans la durée même d'un grand projet. Il faut sérieusement se poser la question de la viabilité industrielle d'une activité qu'on soumet à un tel traitement, la encore pour des raisons essentiellement politiques. Mais il est important de savoir qu'aucune des erreurs de fabrication n'a conduit à un véritable problème de sûreté (autre que ce qu'on peut appeler la « sûreté administrative »), tout simplement parce que les marges de sécurité sont confortables. Et c'est l'existence de ces marges qui conduit aussi les États-Unis à prolonger leurs centrales au-delà de 60 ans voire 80 ans, alors que nous arrêtons les nôtres à 40 ans. Tout cela n'a absolument rien à voir avec la sûreté.

## 2.2. Le cycle du combustible : ressources et déchets (Figure 1)

C'est une erreur classique de disjoindre la question des réacteurs électrogènes et celle du combustible.

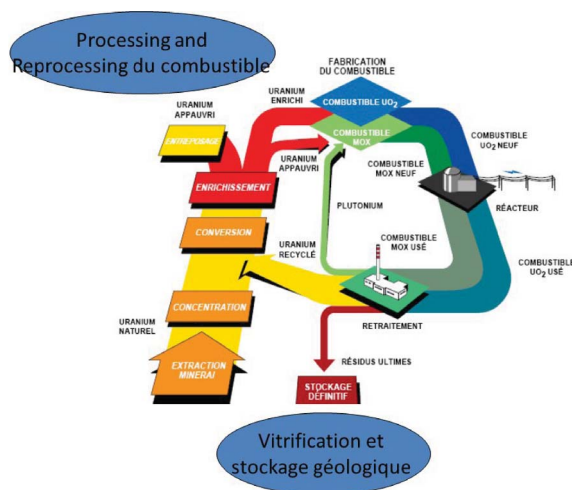


FIGURE 1. Le cycle du combustible en France.

Le choix par la France de la filière REP sous licence Westinghouse, en lieu et place de la filière graphite gaz était lié à la capacité de fabriquer de l'uranium enrichi. Et de même la filière MOX a été développée après l'abandon du surrégénérateur SUPERPHENIX, encore une fois pour des raisons politiques, afin de gérer en partie le Plutonium produit et d'optimiser l'utilisation de la matière fissile.

La compréhension de la filière électronucléaire française suppose, d'une part la prise en compte de l'ensemble du parc réacteur (ceux qui peuvent ou non accepter le combustible MOX), mais aussi les usines de fabrication du combustible, de recyclage du Plutonium dans le combustible MOX, de vitrification des déchets ultimes (Usine de La Hague). Si on arrête les réacteurs, en commençant par les plus anciens, on arrête *de facto* la filière de combustible MOX, sauf à faire des investissements lourds sur les réacteurs récents pour les rendre capable d'utiliser du MOX.

On entend souvent dire que le problème non résolu de l'énergie nucléaire est celui des déchets. A force de le répéter on a fini par en faire une chose admise. A part que, une fois encore, c'est inexact. Les déchets nucléaires sont caractérisés par leur radioactivité et leur temps de vie (c'est-à-dire le temps caractéristique pour transmuter la moitié des atomes radioactifs). Les matériaux fortement radioactifs ont un temps de vie court, les matériaux plus faiblement radioactifs ont un temps de vie long.

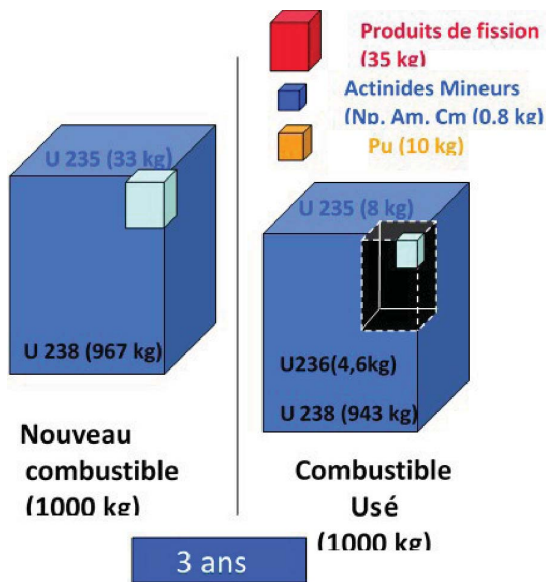


FIGURE 2. Déchets à vie longue générés dans une tonne de combustible après trois ans de fonctionnement.

La Figure 2 donne la proportion des différents types de déchets après l'utilisation de 1 tonne de combustible (dire de quel combustible, UO<sub>2</sub>, enrichi à 3%) pendant 3 ans. Les éléments vraiment problématiques dans la durée sont les actinides (Plutonium et Actinides mineurs).

Le problème des déchets revient à les confiner efficacement de telle façon qu'ils ne puissent être en contact avec l'être humain avant d'avoir considérablement décliné leur radioactivité. Avant de traiter les combustibles usés, qui sont encore « chauds », on les entrepose (par exemple à l'usine de La Hague, ou à Marcoule) pendant quelques dizaines d'années. Ensuite on les « traite » pour en faire des déchets « stockables » sur des durées beaucoup plus longues, de quelques centaines à quelques dizaines de milliers d'années. La solution technique existe : elle consiste à vitrifier les déchets, les colis de déchets ainsi vitrifiés confinant sans problème les produits de fission qui ont une demi-vie de quelques centaines d'années. Les actinides (Plutonium, Américium, Neptunium, Curium ... produits par l'absorption de neutrons par les noyaux d'Uranium) peuvent être vitrifiés ou séparés pour recyclage, ils ont une vie plus longue (de l'ordre de la centaine de milliers d'années). Cette durée correspond à 20 fois la durée de la plus vieille

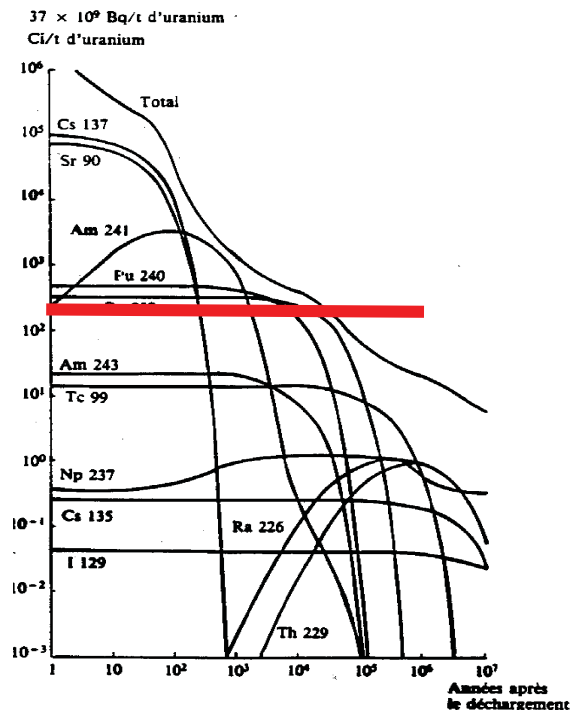


FIGURE 3. Décroissance de la radioactivité en Curie par tonne de déchet entreposé en fonction du temps après déchargement. Le niveau de la radioactivité naturelle est indiqué par la ligne horizontale. Ce qui signifie qu'on doit assurer le confinement des déchets sur des durées de l'ordre de 100 000 ans.

civilisation humaine sur terre. Il est donc difficile de penser à une structure d'ingénierie dont on puisse garantir l'intégrité sur de telles durées. C'est pour cela qu'on s'en remet à la géologie dans des zones non sismiques, pour assurer le confinement.

Le site de Bures en Meuse-Haute Marne, dans le bassin de Paris, avec sa couverture en argile (« calloxfordien ») a été sélectionné pour le stockage géologique profond. Pour être libérés de leur « prison » de verre, les actinides doivent tout d'abord diffuser hors du verre, mais surtout quand ils entrent dans la zone argileuse, ils précipitent c'est-à-dire qu'ils sont piégés en petits agrégats, ou se « collent » par sorption sur les argiles. Leur migration est alors très lente de telle sorte que le temps nécessaire pour qu'ils « sortent de leur piège », c'est-à-dire de la formation argileuse, est tel que la radioactivité est tombée en dessous de sa valeur « naturelle » (Figure 3).

Du point de vue de la santé publique, il est faux de dire que le problème des déchets est non résolu. Du point de vue de l'économie, il est faux de dire qu'il est exorbitant. Pour un volume de déchets HAVL (haute activité, vie longue) correspondant à un parc de 58 centrales sur 40 ans, le coût du stockage des déchets est de quelques centimes d'Euros par MWh.

Reste que le déchet principal est le Plutonium. Il constitue à lui seul 90% de la radioactivité des déchets à vie longue. Et les centrales nucléaires « classiques » ne cessent d'en générer. Il existe une solution à ce problème permettant de « stabiliser l'inventaire Plutonium » : ce sont les réacteurs à neutrons rapides. Ils conduisent à « fermer le cycle du combustible » en brûlant du Plutonium (qui de déchet devient ressource) avec de l'Uranium appauvri qui est autrement inutilisable. Le Plutonium produit est brûlé avec l'Uranium appauvri et est régénéré dans le processus. Les réserves de combustibles sont ainsi multipliées par 1000, ce qui est important en termes de sécurité d'approvisionnement. Le volume des déchets est divisé par 10, ce qui est important pour la gestion de l'aval du cycle. La nécessité de disposer de neutrons « rapides » (à haute énergie) pour les réacteurs à neutrons rapides impose de renoncer à l'eau comme fluide caloporteur et a conduit à utiliser le sodium liquide, ce qui n'est pas une technologie facile (notamment en terme de contrôle non destructif des équipements), mais qui est à un degré de maturité avancé (les Russes ont deux tels réacteurs, les Chinois ont lancé le leur en même temps que nous arrêtons le nôtre, Superphénix en 1998).

La France avait une avance technologique claire sur ce sujet, reconnue au niveau international, avance qui a été sabordée par deux fois, par l'arrêt de Superphénix en 1998, et par l'arrêt du programme Astrid en 2018. Là encore, la raison est purement politique. Celle qui est officiellement avancée est que les réacteurs à neutrons rapides sont plus chers et ne seront rentables que si le prix de l'Uranium est multiplié par trois. Ce calcul fait abstraction des coûts de stockage du Plutonium et de l'Uranium appauvri qui demandera de développer des sites de stockage beaucoup plus importants. Ce choix fait aussi l'impasse sur la raréfaction de l'Uranium que le développement du parc chinois laisse prévoir. La raison qui n'est pas avouable est la volonté de sortir à terme du nucléaire en limitant la ressource et en multipliant les déchets. Cela sans

avoir aucune certitude que l'on pourra se passer du nucléaire.

Nous nous sommes focalisés dans cette section sur le cycle basé sur l'Uranium, qui est celui qui a été développé en France et de par le monde. Il existe d'autres cycles, basés sur le Thorium, qui ne sont pas à ce degré de maturité, mais qui présentent des avantages potentiels, méritant qu'on s'y intéresse à titre exploratoire.

### 2.3. *Le démantèlement des centrales*

Un autre aspect du nucléaire répété *ad nauseam* est l'incapacité où nous serions de démanteler les installations nucléaires en fin de vie. Là encore cette assertion est tout simplement fautive. Fin 2013, il y avait de par le monde 149 réacteurs nucléaires définitivement arrêtés, 119 en cours de démantèlement, 6 dont le démantèlement était achevé avec « retour au vert » (c'est-à-dire au niveau de radioactivité naturelle du sol). En France, le réacteur de Brennilis (de la filière eau-lourde) n'a toujours pas achevé son démantèlement, mais pour des raisons juridiques et un acharnement procédurier des associations antinucléaires qui n'a rien à voir avec la technique. Par contre, le réacteur de Superphénix a pu être démantelé sans problème entre 1998 et 2010. Et le démantèlement des réacteurs d'étude de Grenoble a pu être mené à bien sans encombre, en une dizaine d'années.

La question du démantèlement doit être déclinée suivant trois cas. Le démantèlement des installations « standard » (généralement des centrales électrogènes) qui ne pose aucun problème technique sérieux (hormis peut être la gestion du graphite dans les anciennes centrales graphite-gaz) et nécessite surtout de la rigueur et de la méthode. Le démantèlement des installations « uniques » (généralement des équipements de recherche) qui nécessite des solutions au coup par coup, coûteuses et demandant des innovations techniques. Le démantèlement des installations en situations accidentelles (Tchernobyl, Fukushima) pour lesquelles nous n'avons, à ce jour, que des solutions de confinement et non de démantèlement.

Un autre mythe entretenu est que le démantèlement créerait des emplois. Cela relève de la naïveté ou du mensonge que de penser qu'on va créer des emplois avec une activité de démantèlement qui emploie pour des durées au moins deux fois moindres,

dix fois moins de personnes que celles qui travaillent pour faire fonctionner une centrale. Quant à penser que cette compétence de démantèlement se vendra à l'exportation, cela revient à supposer que ceux de nos concurrents industriels qui ont construit les centrales seront moins capables que nous de les démanteler!

Les conclusions intermédiaires de cet article, consécutives à ce rappel des faits, sont les suivantes. L'énergie nucléaire fournit une électricité essentiellement décarbonée, et pilotable. Cette électricité est sûre du point de vue de la santé publique comme en témoigne le nombre de morts par TWh produits. Les déchets qu'elle génère sont maîtrisés et les technologies pour les traiter sont opérationnelles. Le stockage géologique profond permet de gérer le problème des déchets à vie longue. Le démantèlement des centrales nucléaires en fin de vie n'est pas un problème technique, c'est un problème de réglementation.

### 3. Pour une approche systémique

La lutte contre le réchauffement climatique est un problème de nature globale et de nature systémique. Globale car les actions qui sont menées en un endroit du globe contribuent à un comportement du climat sur toute la planète. Cette constatation triviale implique à la fois que le problème ne peut être traité que dans une dimension internationale, et que l'on peut aisément s'en dédouaner en prétendant que le peu qu'un pays comme la France puisse faire est négligeable vis-à-vis du problème d'ensemble. Notons que c'est faire peu de cas de l'apport potentiel des technologies françaises dans d'autres pays du monde pour les questions énergétiques.

Il n'en reste pas moins vrai que chaque pays, individuellement, doit faire sa part de l'effort. En France où un tiers des émissions des gaz à effet de serre vient des transports, un tiers de la gestion des bâtiments et un tiers de l'industrie (production d'électricité comprise), prétendre décarboner une électricité essentiellement décarbonée ne fait pas grand sens.

De plus, prétendre décarboner cette électricité déjà décarbonée en développant les énergies renouvelables, par nature intermittentes, crée des problèmes de stabilité des réseaux qui imposent, soit de renforcer les réseaux, soit de recourir au stockage massif de l'électricité, soit de développer une gestion

**TABLEAU 4.** Compositions des coûts du kWh pour les particuliers

Composants des coûts	2006	2018
Part énergie (coût de production et de commercialisation)	43%	36%
Part réseaux (péages ATR transport et distribution)	39%	30%
Part taxes (y compris les taxes pour développer les renouvelables)	18%	34%
Total	100%	100%

du vecteur électrique plus délocalisée, soit de développer un autre vecteur que le vecteur électrique, par exemple le vecteur hydrogène. Dans tous les cas, ces solutions pour résoudre un problème que nous nous créons nous-mêmes en refusant une solution que nous avons déjà en place, ont un coût.

La structure du prix de l'électricité en France donnée dans le Tableau 4 montre que ces questions ne sont pas négligeables et que le développement de réseaux renforcés n'est pas une mince affaire.

Les aspects techniques sont eux aussi loin d'être négligeables. Actuellement, les seules solutions de stockage passif de l'électricité sont la remontée de l'eau dans les barrages hydrauliques, qui sont limités par l'existence des sites adaptés. Le stockage électrochimique a fait des progrès considérables, mais semble encore à ce jour mieux adapté à l'électrification des transports qu'au stockage de masse. Il existe des études en cours sur la capacité des véhicules électriques sur le réseau à lisser les pics de consommation, mais cela demande un développement massif du véhicule hybride. Les solutions de stockage de masse par des processus électrochimiques autres que les batteries ne sont pas encore développées de façon industrielle. L'hydrogène qu'on nous présente depuis des décennies comme la solution miracle, se heurte à un double défi : comment le produire à un tarif compétitif avec le reformage du méthane (mais il reste alors d'origine fossile et donc sa production émet du CO<sub>2</sub>, comment le transporter sans pertes excessives. Si on va vers l'électrolyse à chaud à partir des sources intermittentes comment gère-t-on la fatigue thermique des dispositifs d'électrolyse?

Aucune de ces questions ne se heurte à une im-

**TABLEAU 5.** Quelques tarifs pour l'électricité produite par différentes technologies en Euros par MWh. (Source Cap Gemini, 2018)

Mode de production	Prix
Nucléaire ancien	45–80
Eolien terrestre	50–110
Solaire (PV)	55–160
Charbon	60–105
Eolien offshore	100–160
Nucléaire nouveau	100–170
Hydroélectricité	40–120

possibilité physique, mais certainement à des difficultés techniques qui demandent du temps pour les résoudre, et à des défis économiques majeurs. Se lancer dans des transformations profondes de notre *mix* énergétique sans avoir résolu ces problèmes est aventureux. On sent bien que la seule invocation des baisses de coûts de production de telle ou telle source d'énergie est une vision très partielle de la question. Sans même parler du fait qu'on continue à subventionner largement des énergies qu'on dit compétitives...

Le Tableau 5 donne quelques estimations (Cap Gemini) des coûts actuels de l'électricité produite par différentes technologies. Là encore, ces données ne sont qu'indicatives tant est grande la complexité du problème. Par exemple, il semble probable que le prix du solaire photovoltaïque descende à 25 Euros par MWh, mais ni les coûts de stockage ni les coûts de réseaux ne sont inclus. Le prix du nouveau nucléaire ne prend pas en compte les effets de série et dépend très fortement du taux d'actualisation choisi.

Mais si la dimension économique est essentielle, il est d'autres aspects qui méritent de retenir notre attention. Depuis longtemps, Vaclav Smil dans une série de livres sur les transitions énergétiques insiste sur le « contenu implicite » des différentes sources d'énergie. A la différence des estimations économiques, qui ont un certain degré d'arbitraire, les besoins en termes de surface, de matière et d'énergie nécessaire pour produire un kWh d'électricité sont des grandeurs physiques qu'on peut estimer avec une certaine fiabilité, soit par retour d'expérience, soit à partir de leurs principes de fonctionnement. La physique interdit de resserrer

trop les éoliennes pour la simple raison de la conservation de la quantité de mouvement portée par le vent (c'était d'ailleurs une règle bien connue des Hollandais au XVIII<sup>ème</sup> siècle, qu'il ne fallait pas mettre un moulin à une distance trop proche d'un autre moulin). Le contenu énergétique des panneaux photovoltaïques est facile à estimer et le retour d'expérience donne leur durée de vie. Il est facile de connaître la quantité d'acier nécessaire pour une centrale nucléaire et pour un mât d'éolienne. Et ces grandeurs doivent être rapportées à la quantité d'électricité produite par le dispositif au cours de sa durée de vie. A titre d'illustration, le Tableau 6 montre les besoins en surface pour différentes sources d'énergie pour produire 500TWh, ce qui est la consommation annuelle française.

On constate, et ce n'est pas une surprise pour le physicien, que l'énergie nucléaire est économe en surface. Cela traduit simplement, malgré le gigantisme des équipements, que l'énergie libérée provient de l'interaction entre nucléons qui, en densité énergétique, est sans commune mesure avec les énergies chimiques, électro-magnétiques ou gravitationnelles qui gouvernent les autres moyens de production d'électricité. Cette concentration de l'énergie a aussi une conséquence : elle permet de répondre à des besoins concentrés (comme ceux des villes et de l'industrie lourde) sans être contrainte à des réseaux de distributions trop étendus. La même raison explique que la quantité de matière (acier, aluminium, cuivre, béton etc ...) nécessaire pour produire un kWh est, pour le nucléaire, plus faible d'un facteur 10 par rapport au photovoltaïque (200 t par MW électrique) et d'un facteur 35 par rapport au solaire à concentration. Et quand on évalue le EROI (« Energy Return on Investment », c'est-à-dire l'énergie produite rapportée à l'énergie nécessaire pour la produire), celui de l'énergie nucléaire est d'un facteur 30 supérieur à celui du photovoltaïque.

Ces quelques remarques pour simplement remettre en avant que les arguments simplistes sur le coût « nu » des énergies, indépendamment des systèmes dans lesquels elles doivent s'insérer, sans prendre en compte les besoins en termes d'espace et de matière, peuvent être des arguments de vente, ce ne sont pas des arguments de réflexion qui suffisent à guider les choix.

**TABLEAU 6.** Besoins en surface pour différentes sources d'énergie

Technique	Nucléaire	Fossiles	Solaire	Eolien	Biomasse
Empreinte km <sup>2</sup>	4	10	200	1200	5000

#### 4. Conclusions

Le problème du réchauffement climatique est global, les leviers d'action sont locaux. Les solutions les mieux adaptées peuvent varier d'un pays à l'autre, d'un besoin à l'autre.

L'urgence du problème nécessite à la fois de déployer des solutions déjà disponibles, et de lancer des programmes de recherche cohérents pour les solutions à venir.

L'objectif de la dé-carbonation de l'économie est un passage obligé dans la lutte contre le réchauffement climatique. Il faut bien entendu mettre en place les mesures de sobriété énergétique (dans les habitations par exemple, ou dans les transports). Une stratégie efficace est l'électrification de l'économie à partir d'une électricité décarbonée.

L'énergie Nucléaire fournit déjà en France une électricité essentiellement décarbonée. C'est une forme d'énergie peu consommatrice de ressources, de matière, d'espace et d'énergie grise pour sa production. Elle répond aux besoins en énergie des secteurs industriels nécessitant des ressources énergétiques denses et stables. La coexistence des ENR (énergies naturelles renouvelables) et du nucléaire soulève des questions de « flexibilité du parc » qui impliquent des adaptations de réseaux, de moyens de stockage, de gestion des centrales.

L'énergie nucléaire nécessite pour se développer de manière durable une stratégie dans le long terme des investisseurs publics, l'échelle de temps n'étant pas celle des marchés financiers. Et cela ne sera possible qu'en sortant du procès instruit, par idéologie, contre toutes les évidences scientifiques, et qui privent notre pays d'un atout essentiel face à un des défis majeurs de notre époque.

#### Quelques repères bibliographiques

La littérature sur les sujets abordés dans cet article est gigantesque. Nous nous contenterons de

donner ici quelques références permettant de comprendre et d'approfondir le sujet. Dans chaque section, les livres sont classés par ordre de complexité croissante.

#### *Sur l'énergie nucléaire en général*

Bellal A, (2020) « Environnement, climat et energie ». Editions Cassini

Woessner, G. (2019). Faut il sortir du Nucleaire? First edition.

Partanen, R. and Korhonen, J. (2015). Climate Gamble. Create Space.

Barré, B. (2017). Pourquoi le nucléaire? DeBro.ek

Nifenecker, H. (2011). Le nucléaire, un choix raisonnable? Ed.Physique.

#### *Sur les différents types de réacteurs et de combustibles*

Greneche, D. (2016). Histoire et techniques des réacteurs nucléaires et de leurs combustibles. Ed.de Physique.

Guidéz, J. and Pre, G. (2016)le, « Superphénix » (2016) Atlantis Press.

Tarride, B. (2013). Physique, Fonctionnement et Sureté des REPEDP Sciences.

#### *Sur les déchets nucléaires*

Gin, S. (2006). Les déchets Nucléaires.Dunod.

Turlay, R. (1997) Les déchets Nucléaires, un dossier scientifique.

#### *Sur le démantèlement*

Dautray, R. and Bréchet Y. (2015). Sciences du démantèlement des installations nucléaires. Ed.Physique.



*Sur les approches systémiques de la transition énergétique*

- Dautray, R. (2004). *Quelles énergies pour demain?* Odile Jacob.
- McKay D. (2009). *Sustainable energies without the Hot air.* Cambridge University Press
- Smil, V. (2017). *Energy Transitions.* Praeger.
- Smil, V. (2016). *Power density.* MIT Press.
- Hansen, J. P. and Percebois, J. (2017). *Transitions électriques.* Odile Jacob.
- Pietro, P. and Hall, C. (2013) *Spain's photovoltaic revolution, The energy Return on Investment.* Springer.
- Vidal, O. (2018). *Matières premières et énergie : les enjeux de demain.* ISTE.



---

Facing climate change, the range of possibilities / *Face au changement climatique, le champ des possibles*

# Captage et Stockage du CO<sub>2</sub> : le puits de carbone géologique

## *CO<sub>2</sub> Capture and Storage : the geological carbon sink*

Isabelle Czernichowski-Lauriol<sup>a</sup>

<sup>a</sup> BRGM et CO<sub>2</sub>GeoNet, 3 av. Claude-Guillemin, BP 36009, 45060 Orléans Cedex 2, France

Courriel : [i.czernichowski@brgm.fr](mailto:i.czernichowski@brgm.fr)

**Résumé.** Le puits de carbone géologique consiste à « remettre » le carbone dans le sous-sol d'où il a été extrait, afin de réduire les émissions résiduelles incompressibles de CO<sub>2</sub>. Complémentaire aux puits de carbone terrestre (sols et forêts) et océanique, il devrait jouer un rôle clé pour atteindre la neutralité carbone. 19 opérations de captage et stockage de CO<sub>2</sub> (technologie dite CSC, ou CCS en anglais) fonctionnent déjà dans le monde. D'importants efforts de recherche et d'innovation sont menés pour permettre un saut d'échelle et déployer cette technologie partout où ce sera nécessaire. La France, l'Europe et de nombreux pays pensent qu'elle sera incontournable pour parvenir à atteindre les objectifs de l'accord de Paris sur le climat et limiter le réchauffement climatique à +1.5 °C.

**Abstract.** The geological carbon sink consists of “putting back” the carbon into the subsurface from which it was extracted, in order to reduce incompressible residual CO<sub>2</sub> emissions. Complementary to terrestrial (soils and forests) and oceanic carbon sinks, it is expected to play a key role in achieving carbon neutrality. 19 CO<sub>2</sub> capture and storage (CCS) projects are already in operation worldwide. Major research and innovation efforts are being carried out to scale up and deploy this technology wherever it is needed. France, Europe and many countries believe that CCS will be essential to achieve the objectives of the Paris climate agreement and limit global warming to +1.5 °C.

**Mots-clés.** Climat, Emissions, Neutralité carbone, CSC, CSCV.

**Keywords.** Climate, Emissions, Carbon neutrality, CCS, CCUS.

### 1. Les puits de carbone, un recours nécessaire pour lutter contre le réchauffement climatique

L'accord de Paris est le tout premier accord mondial juridiquement contraignant sur le changement climatique, adopté lors de la conférence de Paris sur le climat (COP21) en décembre 2015 [CCNUCC, 2015]. Avec pour objectif principal de contenir la hausse de la température moyenne de la planète bien en dessous de 2 °C par rapport aux niveaux préindustriels

(sur la période de référence 1850–1900), et de la limiter autant que possible à 1,5 °C, l'accord de Paris vise également au renforcement des capacités d'adaptation et de résilience face aux effets du changement climatique, ainsi qu'à la mise en œuvre de flux financiers adaptés à ces objectifs.

Dans son article 4, il est indiqué que tous les Etats qui ont ratifié l'accord doivent chercher à parvenir au plafonnement mondial des émissions de gaz à effet de serre dans les meilleurs délais et à opérer des ré-

ductions rapidement par la suite, conformément aux meilleures données scientifiques, de façon à parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle. Parvenir à cet équilibre, c'est parvenir à ce qui est appelé la « neutralité carbone », qui consiste à compenser par des puits de carbone la part d'émissions de CO<sub>2</sub> incompressibles que nous ne pouvons ou ne savons pas encore réduire de manière satisfaisante. La « neutralité carbone en 2050 » est l'objectif principal retenu par la France pour sa politique d'atténuation du changement climatique, en application de l'accord de Paris [CESE, 2020], et est maintenant inscrite dans la loi [République française, 2019]. Par ailleurs la Commission européenne a présenté, le 4 mars 2020, une proposition de loi climat pour entériner l'objectif de neutralité carbone de l'Union européenne d'ici 2050 [Commission européenne, 2020].

Il existe plusieurs types de puits de carbone. D'abord les puits de carbone dits naturels, mais pour lesquels une intervention humaine est nécessaire pour les préserver ou les renforcer. Les forêts en croissance constituent un puits de carbone, capable de retirer du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère par le mécanisme de photosynthèse, tout comme peuvent l'être les sols et terres agricoles qui stockent de la matière organique (humus, débris végétaux), ainsi que les océans qui piègent du CO<sub>2</sub> atmosphérique par dissolution dans l'eau. Il existe aussi les puits de carbone dits technologiques, il s'agit essentiellement du puits de carbone géologique, qui consiste à capter le CO<sub>2</sub> non pas dans l'atmosphère où il est très dilué, mais dans les fumées des usines qui le recrachent en abondance à des concentrations plus élevées, pour le stocker sous terre dans une couche géologique au-delà d'un kilomètre de profondeur.

Les puits de carbone naturels sont déjà mis à rude épreuve. Jusqu'au début de la révolution industrielle, les échanges naturels entre l'atmosphère, la végétation, les sols et les océans étaient équilibrés, ce qui explique que la teneur atmosphérique en CO<sub>2</sub> soit restée constante sur plusieurs milliers d'années avant 1750. Mais depuis, l'on s'est mis à exploiter massivement les énergies fossiles extraites du sous-sol que sont le pétrole, le charbon et le gaz naturel, très riches en carbone. En brûlant ces combustibles fossiles pour la production d'électricité, le chauffage,

l'industrie et le transport, le carbone se combine à l'oxygène de l'air pour former du dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) qui est alors émis dans l'atmosphère. Heureusement la moitié de ces émissions de CO<sub>2</sub> a été réabsorbée par la végétation et les océans, les puits de carbone naturels, mais l'autre moitié s'est accumulée dans l'atmosphère, conduisant au changement climatique. La teneur en CO<sub>2</sub> de l'atmosphère, qui était restée en dessous de 280 ppm (parties par million, soit 0.028%) depuis plus de 800 000 ans, est ainsi passée à 410 ppm (0,041%) en l'espace de 200 ans environ et continue de croître de plus en plus vite. Face à cet accroissement sans précédent, les puits de carbone naturels terrestre et océanique, même en les stimulant, ne suffiront pas. Leur capacité est limitée et certaines conséquences indésirables se font déjà sentir, telles que l'acidification des océans qui résulte de la dissolution du CO<sub>2</sub> dans l'eau et qui perturbe les écosystèmes marins. De plus ils sont fragilisés par le réchauffement climatique, comme le montre par exemple la destruction de plus en plus fréquente des forêts par les tornades et les incendies. Il y a donc même un risque que ces puits de carbone naturels se transforment en sources de carbone.

Il convient donc d'activer aussi le puits de carbone géologique, ce qui revient à remettre dans le sous-sol, sous forme de CO<sub>2</sub>, le carbone d'où il a été extrait sous forme de charbon, de pétrole ou de gaz naturel. Le CO<sub>2</sub> peut être ainsi piégé de manière permanente et ce piège n'est pas fragilisé par le réchauffement climatique. C'est la technologie appelée « Captage et Stockage de CO<sub>2</sub> » (CSC, ou CCS en anglais pour « CO<sub>2</sub> Capture and Storage »), sur laquelle le GIEC a publié un rapport spécial en 2005 [GIEC, 2005; ADEME et al., 2007].

Le présent article explique comment développer un puits de carbone géologique, présente les premières opérations de CSC en fonctionnement dans le monde et fait part des travaux de recherche en cours pour permettre de déployer plus largement ce puits de carbone y compris en France. Il invite à penser des solutions à l'échelle des territoires et explique pourquoi le puits de carbone géologique peut offrir de la flexibilité aux pays et aux territoires pour atteindre la neutralité carbone et pour permettre une transition énergétique et écologique juste et inclusive.

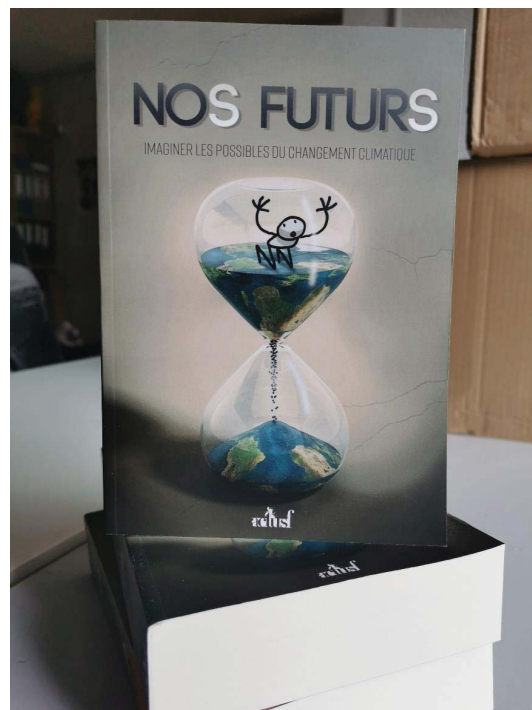
Cet article reprend en grande partie l'article écrit par l'auteur dans le livre « No(s) Futur(s) » paru en librairie en juillet 2020, une anthologie de textes de

science et de fiction destinée à sensibiliser, à informer et à produire des récits autour des enjeux du changement climatique (Figure 1, Czernichowski-Lauriol, 2020). Cet ouvrage est préfacé par sa marraine, Valérie Masson-Delmotte, vice-présidente du groupe 1 du GIEC, groupe qui évalue les aspects scientifiques du système climatique et de l'évolution du climat.

## 2. Comment créer un puits de carbone géologique?

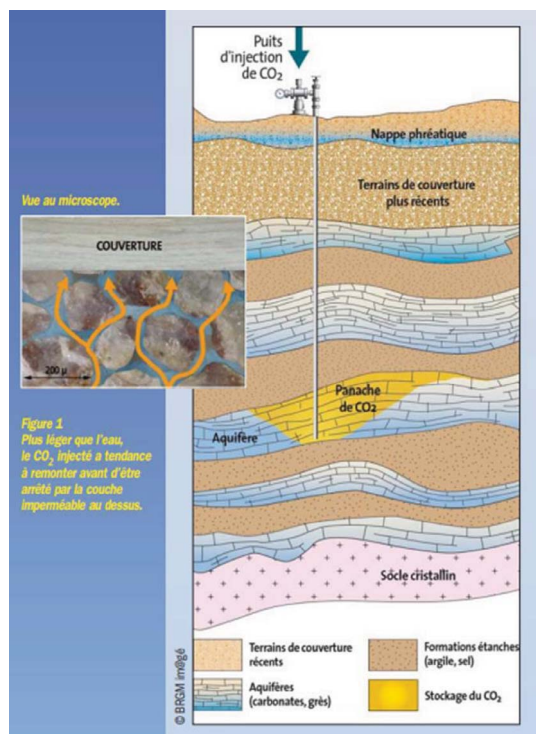
Il faut d'abord capter le CO<sub>2</sub> dans les fumées industrielles, car c'est là qu'il est émis en grande quantité, à une concentration élevée (de 4% à 40%, voire plus). Le capter directement dans l'air où il est extrêmement dilué (0,04%), ou sur des sources mobiles comme les pots d'échappement des voitures, est beaucoup plus complexe et coûteux, même si des recherches en ce sens sont en cours. Le captage consiste à séparer le CO<sub>2</sub> des autres composés présents dans les effluents gazeux industriels (azote de l'air principalement, etc.). Cette étape peut être réalisée par différentes techniques déjà éprouvées ou en cours de développement pour améliorer les performances et réduire les coûts. Par exemple le captage de CO<sub>2</sub> par absorption chimique dans des solvants aminés est classiquement mis en œuvre pour le traitement du gaz naturel, qui en contient un peu naturellement.

Puis le CO<sub>2</sub> doit être transporté jusqu'à un lieu de stockage adéquat, car il ne peut pas être injecté n'importe où dans le sous-sol, il faut que les conditions géologiques s'y prêtent. Le CO<sub>2</sub> capté est donc comprimé à forte pression (>73 atm), passant ainsi d'un état gazeux à un état dense assimilable à un liquide, puis il peut être acheminé par des canalisations (« carboducs ») jusqu'au lieu de stockage. Celles-ci devront être construites pour relier émetteurs de CO<sub>2</sub> et site de stockage. Dans certains cas il pourra être envisagé de reconverter des gazoducs ou oléoducs en carboducs. Il s'agit aussi d'une technologie éprouvée, car plusieurs milliers de kilomètres de canalisations transportant du CO<sub>2</sub> sont déjà en opération dans le monde, principalement en Amérique du Nord et pour une injection dans des réservoirs pétroliers. Le transport par bateaux, par péniches et par camions peut aussi s'envisager.



**FIGURE 1.** Couverture du livre « Nos Futurs. Imaginer les Possibles du Changement Climatique » paru en juillet 2020 aux éditions ActusSF.

Enfin le CO<sub>2</sub> est injecté par un forage au-delà de 800 m de profondeur dans des couches géologiques profondes, poreuses et perméables, de type calcaire ou grès, où le CO<sub>2</sub> vient se loger dans la porosité de la roche, entre les minéraux, repoussant sur les côtés l'eau salée qui y est généralement présente (Figure 2). Le CO<sub>2</sub> se trouve toujours dans un état dense appelé « état supercritique » car, à ces profondeurs, sa température et sa pression sont supérieures à celles de son point critique (31 °C, 73 atm). Il n'est alors, ni à l'état gazeux, ni à l'état liquide, mais a des propriétés intermédiaires entre les deux, notamment une densité proche de celle d'un liquide et une viscosité proche de celle d'un gaz. Ce qui le rend moins enclin à remonter vers la surface qu'un gaz et maximise les quantités stockables dans un volume de roche donnée. Sa densité étant légèrement plus faible que celle de l'eau salée présente dans la couche réservoir de stockage, il a tendance à migrer lentement vers le sommet de cette couche, d'où la nécessité de la présence d'une couche argileuse imperméable au-dessus, appelée roche couverture, qui bloque sa re-



**FIGURE 2.** Principe du stockage de CO<sub>2</sub> en couches géologiques profondes (© BRGM).

montée (piégeage structural). D'autres mécanismes de piégeage interviennent. Le CO<sub>2</sub> dense est aussi piégé sous forme de bulles isolées dans les pores des roches traversées du fait des forces de capillarité (piégeage résiduel). Avec le temps, une partie du CO<sub>2</sub> se dissout dans l'eau salée (piégeage par dissolution) et l'eau enrichie en CO<sub>2</sub> dissous, devenant alors un peu plus lourde, a tendance à migrer vers le bas de la formation de stockage, tout ceci contribuant à piéger de plus en plus efficacement le CO<sub>2</sub>. Les réactions minéralogiques induites par le CO<sub>2</sub> dissous qui acidifie l'eau peuvent même parfois conduire à la formation de minéraux carbonatés, ce qui piège le CO<sub>2</sub> sous forme solide (piégeage minéralogique). L'importance relative de ces quatre mécanismes de piégeage varie au fil du temps et est dépendante des caractéristiques naturelles de chaque site de stockage ainsi que des conditions d'injection.

Mettre en œuvre le puits de carbone géologique nécessite donc d'assembler toute une chaîne de captage, transport et stockage de CO<sub>2</sub>. L'analogie la plus proche avec une pratique industrielle maîtrisée et

largement répandue dans le monde est celle de la production de gaz naturel (CH<sub>4</sub>, le méthane), puis de sa purification, transport par gazoduc et stockage saisonnier à l'état gazeux sous terre, dans une cavité saline ou dans la porosité d'une roche aquifère recouverte d'une roche couverture imperméable. Il est donc réaliste de penser qu'on pourra maîtriser le déploiement à grande échelle du captage et stockage de CO<sub>2</sub>, même s'il y a des différences notables entre les deux filières qui doivent être prises en compte du fait de la nature différente du gaz et de la durée de stockage.

### 3. La nature nous montre qu'il est possible de stocker du CO<sub>2</sub> sous terre

La nature nous montre que c'est faisable car il existe sous terre de nombreux réservoirs naturels de CO<sub>2</sub>, d'origine volcanique ou mantellique et vieux de plusieurs millions d'années, qui prouvent que les couches géologiques peuvent piéger durablement de très grandes quantités de CO<sub>2</sub> [Pearce et al., 2004]. Dans le sud-est de la France par exemple, huit réservoirs naturels de CO<sub>2</sub> ont été découverts lors de l'exploration pétrolière menée dans les années 1960, entre 2 et 4 km de profondeur (Figure 3; Czernichowski-Lauriol et al., 2002). Quand les forages ont été réalisés, croyant avoir découvert du pétrole ou du gaz naturel, c'est avec stupeur qu'il a été constaté que le fluide piégé était du CO<sub>2</sub> (de 66 à 99% CO<sub>2</sub> selon les cas). Ce CO<sub>2</sub> est remonté des profondeurs de la terre à la faveur de failles et s'est accumulé sous une couverture argileuse dans la porosité de la roche sous-jacente. A d'autres endroits il s'est dissout dans les eaux présentes dans l'espace poral des roches rencontrées, dont certaines sont devenues des eaux carbogazeuses exploitées (Vichy, Badoit, Perrier...). Ailleurs, il a pu migrer jusqu'en surface et s'échapper dans l'air par un trou ou une fissure. Ces émanations gazeuses, appelées *mofettes*, sont souvent des curiosités naturelles comme à Neyrac dans l'Ardèche et dans la grotte du chien à Royat dans le Puy de Dôme. Dans certains pays, il y a même des geysers rejetant par intermittence de l'eau et du CO<sub>2</sub>. Les plus connus sont le geyser d'Andernach en Allemagne et Crystal Geyser dans l'Utah aux États-Unis, qui sont des attractions touristiques.

Les émanations naturelles de CO<sub>2</sub> en surface ne causent dans la plupart des cas aucun dommage, car

le CO<sub>2</sub> se disperse dans l'air. Le CO<sub>2</sub> n'est ni inflammable ni explosif, contrairement au méthane. C'est un gaz inodore que nous respirons en permanence et même avalons avec les boissons gazeuses. Il n'est pas toxique à faible dose, contrairement au monoxyde de carbone (CO) qui entraîne des pertes de connaissance dès que sa concentration dans l'air respiré dépasse 0,1%. Tant que la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'air, habituellement de 0,04%, ne dépasse pas 1%, il n'y a aucun effet physiologique. Au-delà, on peut observer une augmentation de la concentration en CO<sub>2</sub> dans le sang et une raréfaction relative de l'oxygène de l'air. Cela peut se traduire par l'accélération du rythme respiratoire et des maux de tête, et, pour des concentrations plus marquées et une durée d'exposition prolongée, par des pertes de conscience voire la mort. Le risque d'asphyxie devient réel, seulement si la fuite a lieu au niveau d'un espace confiné (cave, grotte, bâtiment mal ventilé ...) ou une dépression du sol, car le CO<sub>2</sub> est un peu plus lourd que l'air et peut s'accumuler dans les points bas. Sinon, le gaz se disperse dans l'atmosphère, ce qui annihile évidemment l'objectif écologique, mais ne provoque pas une catastrophe sanitaire.

Des intoxications aiguës au CO<sub>2</sub> en milieu ouvert ne sont possibles que par suite de phénomènes volcaniques libérant des centaines de milliers de tonnes de CO<sub>2</sub> d'un seul coup, un débit qui n'a rien à voir avec celui des fuites mêmes les plus graves qui pourraient émaner d'un stockage de CO<sub>2</sub>. La catastrophe du lac Nyos au Cameroun en 1986 est dans tous les esprits. Elle a été causée par le dégazage brutal du CO<sub>2</sub> d'origine volcanique qui était stocké sous forme dissoute dans les eaux profondes de ce lac de cratère, libérant brutalement en une nuit plus d'un million de tonnes de CO<sub>2</sub> qui, étant plus lourd que l'air, est descendu dans les vallées encaissées et relativement confinées des alentours. Plus de 1700 personnes, le bétail et de très nombreux animaux sont morts dans les 24 h dans un rayon de 14 km. Dans le cas d'un stockage de CO<sub>2</sub>, il n'y a que l'éruption d'un forage qui pourrait relâcher beaucoup de CO<sub>2</sub> d'un coup, mais les débits seraient bien moindres et de la neige carbonique solide se formerait en surface, du fait du refroidissement provoqué par la forte chute de pression. Il y a donc très peu de risques de provoquer des accidents mortels.

Si du CO<sub>2</sub> arrivait à s'échapper d'un stockage à travers les failles et fractures naturelles présentes dans



**FIGURE 3.** Les gisements naturels de CO<sub>2</sub> dans la province carbogazeuse française (grosses étoiles). Les points rouges correspondent à des eaux carbogazeuses exploitées (boissons, thermalisme). (© BRGM).

la roche couverture ou les couches sus-jacentes, les fuites seraient alors plus modestes, n'atteindraient pas forcément la surface, ou mettraient longtemps à y arriver et s'y manifesteraient sous forme de mofettes isolées, sans doute alignées selon les lignes de faille. C'est ce que l'on observe sur un site naturel en Italie (Latera, en Toscane) où du CO<sub>2</sub> d'origine volcanique arrive en surface au niveau d'une prairie [CO<sub>2</sub>GeoNet, 2008]. Les émanations gazeuses sont faibles et très localisées, alignées sur une ligne de faille ou à l'intersection de failles. Elles ressemblent à des points clairs au milieu de la verdure, du fait d'une modification ou d'une disparition très localisée de végétation. Si ces émanations s'arrêtaient, la végétation pourrait revenir. En cas de fuite localisée dans la nappe phréatique, ce n'est pas le CO<sub>2</sub> qui est en soit dangereux, puisque nous buvons des eaux naturelles carbogazeuses, mais les impuretés qui l'accompagnent et la possibilité que la concentration en certains métaux (plomb, zinc, manganèse, aluminium, arsenic ...), naturellement présents en quantités très faibles dans l'eau, puisse augmenter du fait des réactions minéralogiques induites par l'acidification de l'eau. Cela altérerait alors la qualité de l'eau, qui pourrait ne plus être conforme aux normes pour l'eau potable. En cas d'arrêt de la fuite, la ré-équilibration chimique entre l'eau et les minéraux devrait conduire



à un repiégeage de ces éléments.

Quoi qu'il en soit, les stockages de CO<sub>2</sub> devront être conçus pour éviter toute fuite en dehors du réservoir de stockage et être surveillés pour s'assurer que c'est bien le cas, tout en prévoyant des mesures à prendre en cas de comportement anormal. D'où l'importance d'une série de mesures préventives et palliatives.

#### 4. Comment s'assurer qu'un stockage de CO<sub>2</sub> soit réalisé en toute sécurité pour la population et l'environnement local ?

Comment choisir un bon site ? Quelles sont les lignes de conduite à respecter pour s'assurer, avec un niveau de confiance suffisant, que le CO<sub>2</sub> soit stocké à long terme et en toute sécurité dans la formation de stockage ? Il y a cinq grandes catégories de mesures, qui se répartissent tout au long du projet de stockage, depuis sa conception initiale jusqu'à l'arrêt de l'injection et jusqu'à la fin de la phase de surveillance qui se prolonge au-delà, pour vérifier que le site évolue vers une stabilité à long terme (Figure 4 ; Bouc et al., 2012).

La première repose sur une bonne sélection et caractérisation du site de stockage : la roche réservoir et la roche couverture doivent présenter des caractéristiques naturelles adéquates en termes de porosité, de perméabilité, d'épaisseur et d'étendue latérale. Il est aussi important de connaître leurs propriétés chimiques, thermiques et mécaniques qui conditionneront aussi la performance du stockage. Il faut repérer s'il existe des failles, en particulier au niveau de la roche couverture, et des forages pré-existants dans le secteur. On évitera bien sûr de faire un stockage dans une zone où la sismicité est trop élevée, car elle pourrait affecter l'intégrité des puits et de la roche couverture, ou réactiver des failles trop proches. Il faut aussi caractériser les formations situées au-dessus, y compris la nappe phréatique, ainsi que l'environnement de surface, car il faudra éviter toute nuisance (fuite, mouvement de terrain) qui affecterait localement les écosystèmes ou les activités humaines. Cette caractérisation initiale constituera aussi un état de référence indispensable auquel pourra être comparée toute mesure effectuée pendant ou après la fin de l'injection, pour savoir dire si un changement observé est induit par le stockage ou résulte d'une autre cause.

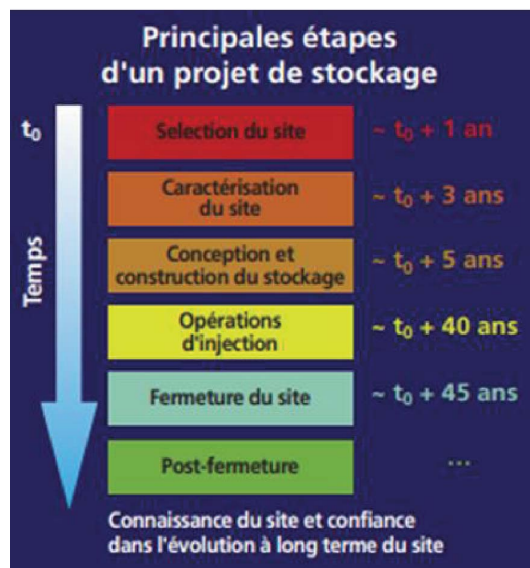


FIGURE 4. Les principales étapes d'un projet de stockage géologique de CO<sub>2</sub> [CO<sub>2</sub>GeoNet, 2008].

La deuxième catégorie de mesures doit évaluer comment effectuer un stockage performant. Des expériences en laboratoire et des modélisations numériques sont réalisées pour simuler l'injection du CO<sub>2</sub> dans le réservoir et le comportement du stockage sur le long terme, bien après la fin de l'injection, sur des milliers d'années. Elles doivent prendre en compte toutes les informations acquises lors de la caractérisation initiale du site, mais aussi les caractéristiques du CO<sub>2</sub> à injecter en termes de quantité (tonnes par jour) et de qualité (% et nature des impuretés). Car selon le procédé de captage mis en œuvre et le type de fumées traitées, il peut y avoir quelques % d'impuretés dans le CO<sub>2</sub> (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> ...). L'objectif est d'estimer combien de CO<sub>2</sub> on va pouvoir stocker (capacité de stockage), de dimensionner les opérations d'injection (nombre, position, inclinaison et type de forages), afin de stocker sans causer de dommages mécaniques qui pourraient fracturer la roche couverture ou être ressentis en surface, et de prévoir au cours du temps où le CO<sub>2</sub> dense et le CO<sub>2</sub> dissous vont se répartir dans la formation hôte ainsi que la proportion relative des quatre mécanismes de piégeage. Les marges d'incertitude dans les prévisions sont ensuite évaluées de manière à tenir compte de la connaissance forcément imparfaite du milieu naturel géologique et des hypothèses

prises pour les modélisations qui sont toujours des représentations simplifiées de la réalité. Les opérations de stockage sont donc dimensionnées avec des marges de sécurité pour qu'aucun phénomène indésirable ne se produise et n'impacte des éléments vulnérables.

La troisième catégorie de mesures doit permettre que les opérations d'injection et de fermeture du site soit menées correctement : il est essentiel de mesurer en continu la pression d'injection, le débit, la température et la composition du CO<sub>2</sub> injecté. Par des méthodes géophysiques (sismiques, gravimétriques, électriques, électromagnétiques ...), il est aussi possible de mesurer de façon indirecte, puis de cartographier la distribution du panache de CO<sub>2</sub> dense et les changements qui se produisent dans le réservoir. Il faut notamment s'assurer que les pressions au sein du réservoir restent toujours inférieures à la pression de fracturation de la roche couverture et n'induisent pas de microséismes ou des déformations perceptibles en surface. Les modélisations initiales sont affinées et améliorées en prenant en compte tous les paramètres mesurés en cours d'injection de manière à décrire le plus fidèlement possible le comportement du stockage. A la fin de l'injection, le puits est bouché en injectant dans le forage un ciment résistant sur une importante hauteur cumulée pour éviter toute remontée de CO<sub>2</sub>.

La quatrième catégorie de mesures concerne la surveillance attentive de tous les milieux qui pourraient être impactés par le stockage dans le cadre de son fonctionnement normal ou en cas de défaillance. C'est-à-dire non seulement le réservoir de stockage mais aussi la roche couverture, les forages, les roches au-dessus du stockage, la nappe phréatique, la surface du sol ou le plancher marin, les écosystèmes. Ceci pour rechercher s'il y a des fuites de CO<sub>2</sub> ou pour identifier de possibles impacts liés au stockage, d'où l'importance d'avoir dressé avant l'injection un état de référence. Différentes méthodes de mesure et d'auscultation du sol et du sous-sol sont combinées pour être capable de détecter, localiser et quantifier le CO<sub>2</sub> et les changements induits, ou pour vérifier qu'il n'y en a pas. La surveillance doit être très active pendant l'injection, puis se poursuivre après la fin de l'injection. Elle pourra ensuite être progressivement allégée du fait de la relaxation progressive des déséquilibres générés par l'injection. Puis

elle pourra être arrêtée si les observations et les modèles montrent de manière convergente que le stockage évolue vers une stabilité à long terme et que les risques d'une évolution altérée sont très peu probables. Le stockage s'apparentera alors à un gisement naturel de CO<sub>2</sub>.

La cinquième catégorie de mesures concerne la maîtrise des risques en cas d'évolution altérée du stockage. Que ce soit des fuites ou des désordres mécaniques, il faut pouvoir comprendre leurs causes et estimer la gravité de leurs conséquences qui est fonction de l'ampleur du phénomène et de la présence d'éléments vulnérables autour du stockage, à savoir les populations, les infrastructures humaines et les écosystèmes naturels. Par exemple, face à un séisme ressenti, il sera important de savoir s'il est dû à la sismicité naturelle ou s'il s'agit de sismicité induite par les opérations d'injection. En cas de fuite de CO<sub>2</sub> en surface, pour en apprécier la gravité pour les populations, il faudra mesurer la concentration dans l'air du CO<sub>2</sub> et des substances associées et faire des simulations pour voir comment il se disperse dans l'atmosphère et s'il peut s'accumuler en partie dans des points bas ou des zones mal ventilées. C'est pendant la période d'injection que les risques sont les plus élevés, mais ils peuvent être facilement contrôlés. Sur le long terme, le niveau de risque décroît avec le temps, car l'augmentation de pression qu'avait causée l'injection se dissipe en partie progressivement, du fait de processus naturels d'atténuation (dissolution dans l'eau du réservoir, minéralisation, etc.), jusqu'à atteindre une stabilité.

En conclusion, il est clair que la maîtrise du risque passe avant tout par des mesures préventives, telles qu'un bon choix de site et des opérations d'injection et de surveillance correctement effectuées. Chaque site doit faire l'objet d'une analyse des risques détaillée et prévoir les mesures correctives à mettre en place en cas d'irrégularités. Il est indispensable de pouvoir détecter au plus tôt toute défaillance par des réseaux de surveillance adaptés. De nombreuses méthodes de surveillance ont été développées pour être en mesure de détecter, localiser et quantifier toute anomalie dans tous les milieux : dans les forages, le réservoir, la roche couverture, les roches sus-jacentes (au-dessus), la nappe phréatique, la surface du sol ou le plancher marin, les écosystèmes. Elles se basent sur des techniques géochimiques, géophy-



siques, biogéochimiques et même de télédétection (par avion, drone ou satellite). Quant aux mesures correctrices, il est par exemple possible de réduire la pression dans le réservoir, en diminuant le débit d'injection de CO<sub>2</sub> ou en extrayant de l'eau salée qui y est présente. Il est aussi envisageable de colmater une zone de faille ou le ciment défectueux d'un puits. Enfin, s'il s'avère que le stockage présente des défauts majeurs imprévus, il peut aussi être décidé d'arrêter l'injection, et comme mesure ultime de maîtrise du risque de récupérer le CO<sub>2</sub> injecté pour l'acheminer vers un site de stockage plus approprié ou pour le rejeter à l'atmosphère. Certes, le but initial était d'éviter par le stockage d'émettre du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, mais le fait de devoir le faire pour un stockage défectueux ne remettrait pas en cause l'intérêt d'activer ce puits de carbone dans de nombreux autres endroits.

Depuis les années 2000, des textes juridiques et réglementaires ont été élaborés pour encadrer cette nouvelle technologie de captage et stockage de CO<sub>2</sub>, afin qu'elle puisse être mise en œuvre en toute sécurité pour contribuer à la lutte contre le réchauffement climatique. Deux conventions internationales dont l'objectif est la protection du milieu marin ont été amendées pour permettre un stockage de CO<sub>2</sub> sous les fonds marins (Protocole de Londres, Convention OSPAR). Depuis 2009, il existe une directive européenne relative au stockage géologique de CO<sub>2</sub>, qui a été transposée en droit français en 2010 et 2011 [Union Européenne, 2009]. Récemment des normes ISO internationales ont été élaborées relatives au captage, au transport et au stockage du CO<sub>2</sub>. L'exploitant d'un site de stockage connaît donc les lignes de conduite à respecter et doit demander un permis de stockage. Quant aux autorités nationales de contrôle, elles savent ce qu'il convient d'exiger et de vérifier.

Au-delà d'une période de surveillance active du site de stockage par l'exploitant, le transfert de responsabilité à l'Etat est prévu, une trentaine d'années après la fin de l'injection, sur la base de trois conditions : la conformité entre les modèles et les observations, l'absence de fuite détectable, la démonstration de l'évolution du stockage vers la stabilité à long terme. L'exploitant doit démanteler toutes les installations dont l'Etat ne fera plus usage et doit fournir à l'Etat un plan de surveillance reposant sur des mesures passives, c.-à-d. ne nécessitant pas une inter-

vention particulière de l'Etat mais faisant partie de ses missions générales (par exemple via le suivi des aquifères d'eau potable, de la sismicité, des teneurs en CO<sub>2</sub> en surface, etc.). L'exploitant devra aussi indiquer à l'Etat les mesures actives qu'il avait prévues lors de la phase sous sa responsabilité, afin que l'Etat puisse les activer en cas de dysfonctionnement. Mais en principe le site de stockage évoluera vers un état d'équilibre stable et se confondra sur le long terme avec un gisement naturel de CO<sub>2</sub>.

## 5. Les installations de captage et stockage de CO<sub>2</sub> déjà en fonctionnement dans le monde

Actuellement, il y a 19 opérations de taille industrielle en fonctionnement dans le monde, captant et stockant chacune de l'ordre de 1 million de tonnes de CO<sub>2</sub> par an (soit pour chacune l'équivalent des émissions en CO<sub>2</sub> de 250.000 voitures sur un an) [GCCSI, 2019]. Le Tableau 1 en donne la liste et les principales caractéristiques. Dix de ces opérations sont adossées à du traitement de gaz naturel (méthane), car celui-ci peut contenir 10% ou plus de CO<sub>2</sub>. Il faut donc purifier le méthane en réduisant son taux de CO<sub>2</sub> sous 2,5% avant de pouvoir le vendre. C'est une pratique qui existe depuis longtemps, bien avant la prise de conscience des enjeux climatiques, le CO<sub>2</sub> capté étant relâché dans l'atmosphère. L'opération de Sleipner en Norvège est une première mondiale, car c'est la première fois qu'il a été décidé à des fins purement climatiques de réinjecter le CO<sub>2</sub> dans le sous-sol (sous la Mer du Nord). Et cela fait presque 25 ans qu'elle est en fonctionnement.

Deux opérations sont adossées à des centrales thermiques produisant de l'électricité à partir de charbon, l'une au Canada depuis 2014, la première au monde, l'autre aux Etats-Unis depuis 2017. Une autre est adossée à une usine sidérurgique à Abu Dhabi depuis 2016, une première mondiale aussi. Deux opérations concernent la production d'engrais aux Etats-Unis. Trois opérations en Amérique du Nord concernent la production d'hydrogène à partir de charbon ou de gaz naturel. Enfin il y a une usine de production de biocarburants (éthanol) à partir de maïs aux Etats-Unis, qui fonctionne depuis 2017, c'est la première dans le monde à être équipée d'un système de captage et stockage de CO<sub>2</sub>. A noter que dans ce cas, contrairement aux 18 autres, le CO<sub>2</sub>

**TABLEAU 1.** Les 19 opérations de captage et stockage de CO<sub>2</sub> en fonctionnement dans le monde en 2019 [GCCSI, 2019]. En aquifère salin profond (AQ) ou en réservoir d'hydrocarbures avec récupération assistée de pétrole (RH)

Continent	Pays	Nom de l'opération de CSC	Type d'installation industrielle où le CO <sub>2</sub> est capté	Capacité de captage de CO <sub>2</sub> (Mt CO <sub>2</sub> /an)	Type de stockage de CO <sub>2</sub>	Année de mise en opération		
Europe	Norvège	Sleipner	Traitement de gaz naturel	1	AQ	sous la mer	1996	
		Snohvit	Traitement de gaz naturel	0,7	AQ	sous la mer	2008	
Amérique	Etats-Unis	Terrell (ex Val Verde)	Traitement de gaz naturel	0,4-0,5	RH	sur terre	1972	
		Enid Fertiliser	Production d'engrais	0,7	RH	sur terre	1982	
		Shute Creek	Traitement de gaz naturel	7	RH	sur terre	1986	
		Century Plant	Traitement de gaz naturel	8,4	RH	sur terre	2010	
		Coffeyville	Production d'engrais	1	RH	sur terre	2013	
		Air Products	Production d'hydrogène par reformage de gaz naturel	1	RH	sur terre	2013	
		Lost Cabin	Traitement de gaz naturel	0,9	RH	sur terre	2013	
		Illinois Industrial CCS	Production d'éthanol	1	AQ	sur terre	2017	
		Petra Nova	Production d'électricité à partir de charbon	1,4	RH	sur terre	2017	
		Etats-Unis et Canada	Great Plains Synfuels Plant & Weyburn-Midale	Production d'hydrogène par gaséification du charbon	3	RH	sur terre	2000
		Canada	Boundary Dam CCS	Production d'électricité à partir de charbon	1	RH	sur terre	2014
Production d'hydrogène par reformage de gaz naturel	1			AQ	sur terre	2015		
Brésil	Petrobras Santos Basin CCS	Traitement de gaz naturel	3	RH	sous la mer	2013		
Asie	Arabie Saoudite	Uthmaniyah	Traitement de gaz naturel	0,8	RH	sur terre	2015	
	Emirats Arabes Unis	Abu Dhabi CCS Phase 1	Production d'acier et de fer	0,8	RH	sur terre	2016	
	Chine	Jilin	Traitement de gaz naturel	0,6	RH	sur terre	2018	
Océanie	Australie	Gorgon	Traitement de gaz naturel	3,4-4	AQ	sous la mer	2019	

émis n'est pas le résultat de l'utilisation d'énergie fossile, mais de la fermentation biologique du maïs, qui pour pousser avait absorbé du CO<sub>2</sub> atmosphérique par photosynthèse. Le CO<sub>2</sub> stocké est donc indirectement du CO<sub>2</sub> atmosphérique, ce qui revient à retirer du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère. C'est ce que le GIEC appelle un scénario à émissions négatives, c.-à-d. où du CO<sub>2</sub> est retiré de l'atmosphère pour être stocké dans le sous-sol, sachant que plus on tarde à réduire les émissions à la source, plus on aura besoin de recourir à ce type de solutions [GIEC, 2019].

Quant aux stockages, ils sont réalisés, en dehors des zones montagneuses, dans des bassins sédimentaires qui sont le résultat d'un dépôt de sédiments dans le passé géologique conduisant à une alternance de couches géologiques poreuses et perméables remplies d'eau, appelées aquifères, et de

couches imperméables de type argiles, marnes, ou sel. En proche surface ces aquifères sont remplis d'eau douce et sont souvent utilisés pour fournir de l'eau potable, on parle de nappe phréatique. En profondeur l'eau est de plus en plus salée et devient même plus salée que l'eau de mer, donc totalement impropre à la consommation humaine. Localement cette eau est parfois remplacée par du pétrole, du méthane (CH<sub>4</sub>) ou même du CO<sub>2</sub> naturel, piégés dans les pores des roches. C'est ainsi qu'on distingue deux cibles pour le stockage de CO<sub>2</sub>. D'une part les aquifères salins profonds qui offrent des capacités de stockage de CO<sub>2</sub> très importantes et ont une grande étendue géographique, ce qui favorise le rapprochement entre émetteurs de CO<sub>2</sub> et sites de stockage. D'autre part, les gisements de pétrole et de gaz naturels épuisés ou sur le déclin, dont l'existence montre

qu'une structure naturelle de piège existe. Ceux-ci sont présents dans un nombre d'endroits plus limités et ont des capacités de stockage moindre; néanmoins, c'est une solution attrayante d'autant plus que l'injection de CO<sub>2</sub> dans ces réservoirs peut faciliter l'extraction d'une partie des hydrocarbures restants. Le procédé dit de « récupération assistée d'hydrocarbures par injection de CO<sub>2</sub> » est déjà largement utilisé dans l'industrie pétrolière depuis quelques décennies, notamment aux États-Unis mais aussi en Europe.

Sur les 19 opérations en fonctionnement, 5 font l'objet de stockages en aquifère salin profond, les 14 autres en réservoir pétrolier et sont associées à de la récupération assistée de pétrole. C'est que dans ce cas, les coûts du captage, transport et stockage de CO<sub>2</sub> sont compensés par la vente du pétrole additionnel produit. Les deux stockages en aquifères profonds salins en Norvège sous la mer du Nord ont pu être réalisés car leurs coûts sont compensés par l'exonération de paiement d'une taxe existant dans ce pays sur les émissions de CO<sub>2</sub> offshore. Les 3 autres ont pu bénéficier de subventions publiques. Il est par ailleurs important de noter que 15 des 19 stockages sont réalisés sur les continents, tandis que les 4 autres sont situés sous le plancher océanique.

## 6. Les coûts de mise en œuvre et la recherche d'un modèle économique viable

Les coûts du captage et stockage de CO<sub>2</sub> sont actuellement compris entre 20 et 120 € par tonne de CO<sub>2</sub> évité [ZEP, 2015]. L'essentiel du coût (jusqu'à 80%) est lié au processus de captage. Mais celui-ci est très réduit si le CO<sub>2</sub> est déjà séparé dans le cadre du processus de production, comme c'est le cas pour le traitement du gaz naturel et la production d'engrais et de bioéthanol. Cela explique pourquoi ce type d'industries est déjà fortement représenté parmi les 19 opérations de CSC déjà en fonctionnement. Les coûts de captage les plus importants concernent les installations où le CO<sub>2</sub> dans les fumées est plus dilué, à savoir la production d'électricité à partir de charbon ou de gaz, ainsi que la production d'acier et de ciment. Le coût du transport et du stockage du CO<sub>2</sub> représente une part relativement faible du coût total du projet, soit environ 10 € par tonne de CO<sub>2</sub> pour un stockage à terre, et 25 € pour un stockage sous la mer. Tous ces coûts ne sont que des estimations car

ils sont dépendants d'un grand nombre de facteurs, tels que le coût de l'énergie, la distance de transport et la profondeur du stockage. Comme pour tout type de technologies, on s'attend à des réductions de coûts importantes à la suite des premiers retours d'expérience et de l'apprentissage par la pratique, mais aussi via l'émergence de nouvelles méthodes et procédés qui sont actuellement à divers stades de développement.

Pour que de nouveaux projets puissent voir le jour, les coûts de mise en œuvre doivent être compensés par des revenus, il faut donc un modèle économique viable qui pousse à investir, ce qui est encore rarement le cas. Peu de pays ou de régions ont commencé à donner un prix au carbone afin de lutter contre le changement climatique, et les niveaux de prix sont encore trop bas. Le marché européen d'échange de quotas d'émissions de CO<sub>2</sub> a été créé en 2005 mais il a mal fonctionné du fait de causes diverses (trop de quotas attribués gratuitement, crise économique de 2008, fraude...), ce qui fait que le prix de CO<sub>2</sub> sur ce marché est descendu très bas, à environ 5 € la tonne de CO<sub>2</sub>. C'est notamment pour cela qu'il n'y a pas encore d'opérations de captage et stockage de CO<sub>2</sub> en fonctionnement en Europe, en dehors de la Norvège. Mais ce prix commence à augmenter et a atteint 25 € début 2020 sur ce marché européen. Certains pays ont instauré une taxe carbone, comme la Norvège dès 1991 (valeur de 57 € la tonne de CO<sub>2</sub> en 2018) d'où l'opération CSC de Sleipner. La France en a introduit une en 2014, qui valait 7 € à l'époque, 55 € en 2018 et qui devrait monter progressivement jusqu'à 100 € en 2030. Les conditions économiques favorables au déploiement du puits de carbone géologique seront atteintes dès que le prix du carbone aura suffisamment augmenté et qu'en parallèle le coût du CSC aura suffisamment baissé. A noter qu'aux États-Unis, un crédit d'impôt dit 45Q attribue actuellement un crédit de 50 dollars par tonne pour le CO<sub>2</sub> stocké de manière permanente en aquifère salin profond, et 35 dollars par tonne dans le cas d'un stockage en gisement d'hydrocarbure avec récupération assistée de pétrole [GCCSI, 2020b]. C'est un signal fort qui encourage les investissements et la préparation de nouveaux projets de taille industrielle.

## 7. Des efforts accrus de recherche pour pouvoir déployer massivement ce puits de carbone

Via les 19 opérations industrielles de captage et stockage de CO<sub>2</sub> en fonctionnement dans le monde, environ 40 Mt de CO<sub>2</sub> sont captées par an et plus de 230 Mt de CO<sub>2</sub> ont été déjà injectées dans le sous-sol en toute sécurité. L'Agence Internationale de l'Énergie estime, dans un de ses scénarios, que 107 Gt de CO<sub>2</sub> devront être stockées d'ici à 2060 pour atteindre les objectifs en matière de climat et d'énergie à moindre coût [AIE, 2019]. Ce qui veut dire qu'il faudrait plus de 2000 nouvelles opérations de CSC, voire bien plus si l'on veut pouvoir limiter le réchauffement à 1,5 °C [GCCSI, 2020a]. Les capacités de stockage au niveau mondial sont en principe suffisantes (au moins 2000 Gt CO<sub>2</sub> comme le rapporte le GIEC dans son rapport spécial de 2005), mais cela nécessite un saut d'échelle considérable! C'est pourquoi des efforts accrus de recherche et d'innovation sur cette technologie ont été demandés par les États, que ce soit au niveau international par la « Mission Innovation » sur les énergies propres lancée à la conférence COP21 sur le climat à Paris en 2015 [Mission Innovation, 2017, 2019], au niveau européen par le plan stratégique pour les technologies énergétiques élaboré en 2015 [SET-Plan, 2017], et en France où ce puits de carbone géologique est mobilisé de manière prudente, à hauteur de 15 Mt CO<sub>2</sub>/an en 2050, dans le scénario de référence de la Stratégie Nationale Bas-Carbone révisée [MTES, 2020].

Un grand nombre de projets de recherche et de tests à échelle pilote sont donc en cours en Europe et dans le monde, afin d'augmenter les performances, faire baisser les coûts, réduire toujours plus les risques, faciliter le déploiement dans des contextes variés. Quatre nouvelles opérations de CSC sont déjà en construction, deux en Chine et deux au Canada. Dix autres sont en phase avancée de préparation, dont deux en Europe. L'une en Norvège où le CO<sub>2</sub> va être capté sur deux usines proches d'Oslo, une cimenterie et une usine de valorisation énergétique des déchets, pour être stocké sous la mer du Nord au large de Bergen. L'autre aux Pays-Bas où Rotterdam se prépare à être une plaque tournante pour la collecte de CO<sub>2</sub> de diverses industries et son stockage sous la mer du Nord. Par ailleurs le Royaume-Uni commence sérieusement à préparer plusieurs pro-

jets de captage de CO<sub>2</sub> en provenance de plusieurs types d'industries pour le stocker aussi sous la mer du Nord [GCCSI, 2019].

## 8. Où en est-on en France?

En France, il n'est pas encore prévu de projet de grande envergure. Mais la recherche académique et industrielle est très active et quelques installations pilotes ont vu le jour pour tester à échelle réduite des technologies de captage, comme sur la centrale à charbon du Havre et bientôt sur l'usine sidérurgique de Dunkerque. Par ailleurs, TOTAL a testé à Lacq une première chaîne industrielle intégrée de captage-transport-stockage de CO<sub>2</sub> en Europe, avec un pilote intégrant le captage de CO<sub>2</sub> sur une chaudière à gaz, son transport par une canalisation de 27 km et son stockage dans un gisement de gaz épuisé à une profondeur de 4,5 km (réservoir de Rousee proche de Lacq). Plus de 51 000 tonnes de CO<sub>2</sub> ont ainsi été stockées avec succès de 2010 à 2013 [TOTAL, 2013].

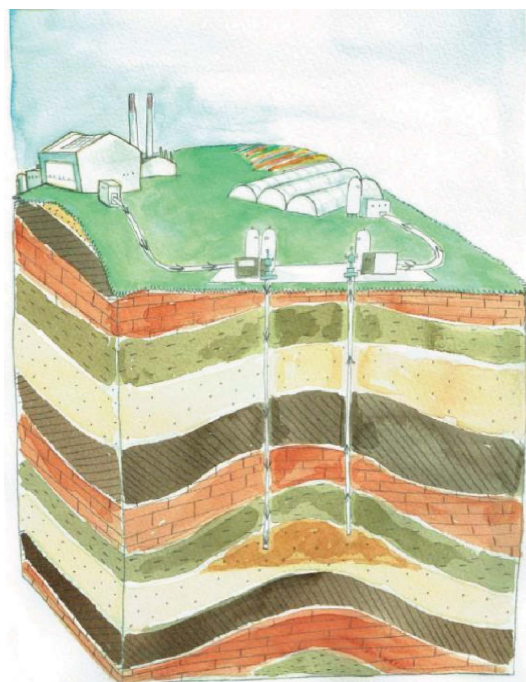
Le BRGM, service géologique national, a été le premier acteur français à se mobiliser, en participant dès 1993 au premier projet de recherche européen intitulé « The underground disposal of carbon dioxide », dans le cadre du 3<sup>ème</sup> Programme Cadre de Recherche et Développement européen (3<sup>ème</sup> PCRD) appelé « Joule II » [Holloway et al., 1996]. A l'époque, certaines personnes pensaient déjà que l'homme était en train de perturber le climat et qu'il ne fallait pas attendre d'en être sûr pour trouver des solutions, sinon ce serait trop tard. Ce projet a permis de conclure en la pertinence du concept de captage de CO<sub>2</sub> au niveau des installations industrielles et de son stockage permanent dans le sous-sol, afin de lutter contre le réchauffement climatique.

Actuellement, la France coordonne 4 projets de recherche européens dans le cadre du 8<sup>ème</sup> PCRD appelé Horizon 2020. Le BRGM coordonne le projet ENOS « Enabling Onshore CO<sub>2</sub> Storage in Europe » (2016–2020), qui s'attaque aux spécificités du stockage du CO<sub>2</sub> onshore (sur le continent), proche des lieux d'émission, car l'Europe ne peut pas compter uniquement sur un stockage dans le sous-sol de la mer du Nord pour réduire ses émissions de gaz à effet de serre d'au moins 80% d'ici 2050 [Gastine et al.,

2017]. Le BRGM coordonne aussi le projet STRATEGY CCUS (2019–2023) qui élabore des scénarios de déploiement de solutions de captage, stockage et utilisation du CO<sub>2</sub> dans 8 régions jugées favorables d'Europe du Sud et de l'Est, dont la vallée du Rhône (du complexe industriel de Fos-Berre/Marseille jusqu'à Lyon) et le Bassin parisien (de Dunkerque au Havre, Paris et Orléans). L'objectif est de fournir aux gouvernements et aux citoyens des pays concernés (France, Espagne, Portugal, Croatie, Grèce, Roumanie, Pologne) un aperçu de la faisabilité du déploiement de cette solution technologique dans leurs régions, en lien étroit avec un large éventail d'activités socio-économiques locales, afin de les aider à atteindre la neutralité carbone. L'IFP Energies nouvelles coordonne le projet CHEERS (2018–2022) qui va tester un procédé innovant de captage du CO<sub>2</sub> sur un pilote en Chine, ainsi que le projet 3D (2019–2022) qui veut faire la démonstration d'un autre procédé innovant de captage de CO<sub>2</sub> sur l'aciérie d'ArcelorMittal à Dunkerque. Ce dernier projet s'inscrit dans une étude plus globale consacrée au développement du futur pôle européen de captage-stockage de CO<sub>2</sub> de Dunkerque - Mer du Nord.

La région Centre-Val de Loire s'intéresse à cette technologie et cofinance deux projets de recherche régionaux coordonnés par le BRGM. Le projet CO<sub>2</sub>SERRE (2020-2022) étudie comment capter le CO<sub>2</sub> émis par deux usines près d'Orléans, une chaufferie biomasse et une sucrerie, pour l'utiliser dans les serres locales qui ont des besoins croissants car le CO<sub>2</sub> stimule la croissance des plantes et améliore les rendements, et pour stocker le surplus localement sous forme de CO<sub>2</sub> dense dans un aquifère salin profond. Un concept similaire a été étudié aux Pays-Bas dans le cadre du projet de recherche européen ENOS (Figure 5). Un autre projet, appelé GEOCO<sub>2</sub> (2019–2020), étudie le potentiel en région Centre-Val de Loire du concept combinant le stockage du CO<sub>2</sub> sous forme dissoute avec la production de chaleur géothermique et qui avait fait l'objet à l'origine d'un projet financé par l'Agence Nationale de la Recherche [Kervéan et al., 2017].

La France est par ailleurs membre fondateur d'ECCSEL, l'infrastructure de recherche européenne sur le captage et le stockage de CO<sub>2</sub>. Depuis 2017, elle a un statut juridique (ERIC – European Research Infrastructure Consortium), avec 5 états fon-



**FIGURE 5.** Captage du CO<sub>2</sub> d'une chaufferie biomasse ou à gaz fonctionnant à plein régime en hiver pour le stocker sous terre, avec reproduction en été d'une partie du CO<sub>2</sub> stocké pour alimenter des serres agricoles (© Sapienza University of Rome – CERI – CC BY NC ND; ENOS, 2017).

dateurs : la Norvège (siège), la France, l'Italie, les Pays-Bas et le Royaume-Uni. ECCSEL est une infrastructure de recherche distribuée qui met à la disposition des chercheurs et ingénieurs du monde entier des plates-formes de recherche de pointe pour développer les technologies de captage, stockage et utilisation de CO<sub>2</sub>. ECCSEL-FR, inscrit dans la stratégie nationale des infrastructures de recherche [MESRI, 2018], rassemble l'ensemble des équipements et organismes français permettant d'assurer la présence française dans l'infrastructure européenne ECCSEL. Le BRGM a été désigné par le gouvernement français pour en assurer la coordination.

Le BRGM héberge à Orléans le siège de l'association CO<sub>2</sub>GeoNet, le réseau d'excellence européen sur le stockage géologique de CO<sub>2</sub> initié en 2004 grâce à un projet européen (6<sup>ème</sup> PCRD) et qui est devenu

une association loi 1901 en 2008 [Czernichowski-Lauriol et al., 2009]. Ce réseau a grandi d'année en année, ses membres sont actuellement 29 instituts de recherche sur 21 pays. CO<sub>2</sub>GeoNet, à travers ses 4 domaines d'activité (recherche, formation, conseil et expertise scientifique, information et communication) a consolidé son rôle de voix scientifique de l'Europe sur le stockage géologique du CO<sub>2</sub>. Son évènement phare est l'Open Forum organisé chaque année à Venise pour permettre de débattre des avancées réalisées pour la mise en œuvre du puits de carbone géologique. CO<sub>2</sub>GeoNet est accrédité, en tant qu'ONG Recherche, par la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique et participe chaque année, depuis la COP21 à Paris, à la conférence mondiale sur le climat, en organisant des conférences et des stands d'exposition pour expliquer ce qu'est ce puits de carbone et comment le mettre en œuvre [Czernichowski-Lauriol et al., 2017]. Une des réalisations marquantes de CO<sub>2</sub>GeoNet est la brochure « Que signifie vraiment le stockage géologique de CO<sub>2</sub>? », disponible en 30 langues [CO<sub>2</sub>GeoNet, 2008].

En France, de plus en plus de laboratoires académiques, d'organismes de recherche et d'entreprises se mobilisent pour développer les technologies de captage et de stockage de CO<sub>2</sub>, mais aussi diverses options de valorisation du CO<sub>2</sub>. La plupart sont regroupés au sein du Club CO<sub>2</sub>, un lieu d'échanges, d'informations et d'initiatives entre les acteurs du monde industriel et de la recherche [Club CO<sub>2</sub>, 2015]. Créé en 2002 sous la coordination de l'ADEME, avec le soutien du BRGM et de l'IFP Energies nouvelles, le Club CO<sub>2</sub> est devenu une association loi 1901 en 2008, d'abord sous présidence du BRGM puis de l'IFP Energies nouvelles depuis 2020. Il est important de noter que tous ces acteurs français sont à la pointe de la recherche et de l'innovation dans ce domaine au niveau international et couvrent tous les maillons de la chaîne de valeur : captage, transport, stockage, utilisation du CO<sub>2</sub>. Les compétences sont donc là pour viser une mise en œuvre en France et des marchés à l'export, comme souligné dans la feuille de route nationale [ADEME, 2011].

A noter que la Stratégie Nationale Bas-Carbone révisée en 2020 appelle à soutenir les développements d'unités pilotes et éventuellement commerciales en captage et stockage du carbone (CSC), ainsi qu'en captage et utilisation du carbone (CUC) avec l'utili-

sation du CO<sub>2</sub> comme matière première dans la fabrication de carburants ou de produits chimiques [MTES, 2020].

## 9. Des solutions à penser d'abord à l'échelle des territoires

La neutralité carbone en 2050 ne sera atteignable que si nous mobilisons tous les moyens possibles et que nous nous attaquons à tous les secteurs émettant des gaz à effet de serre : transport, habitat, agriculture, industrie, transformation d'énergie, déchets. Bien sûr, en premier lieu, il faut tout faire pour réduire à la source les émissions de CO<sub>2</sub> : consommer moins d'énergie en promouvant la sobriété et l'efficacité énergétique, développer les énergies renouvelables, éviter le plus possible d'avoir recours aux énergies fossiles, ce qui n'est pas simple car elles assurent encore aujourd'hui plus de 80% de la production totale d'énergie dans le monde, modifier les processus industriels et les pratiques agricoles, arrêter les déforestations massives ... Mais pour la part d'émissions de CO<sub>2</sub> incompressible que nous ne pouvons ou ne savons pas encore réduire de manière satisfaisante, il faudra actionner les puits de carbone pour compenser les émissions, afin de parvenir à la neutralité carbone, indispensable pour limiter le réchauffement climatique en dessous de 2 °C.

Penser des solutions à l'échelle des territoires c'est utiliser les atouts d'un territoire pour faire émerger la meilleure combinaison de moyens, en associant l'ensemble des acteurs de ce territoire (collectivités, préfecture et services déconcentrés de l'état, entreprises, universités, organismes de recherche, agences, associations, citoyens ...). Car, en fonction des caractéristiques géographiques, géologiques et socio-économiques d'un territoire, beaucoup de variantes dans les solutions et dans les combinaisons de solutions sont possibles pour trouver ce qui est le mieux adapté au territoire. Et plus la panoplie d'outils est large, plus les chances de pouvoir atteindre les objectifs fixés sont importantes, et plus cela offre de la flexibilité pour parvenir à le faire à moindre coût et de manière juste, c'est-à-dire sans que personne ne soit laissé au bord du chemin. Pouvoir mettre en œuvre un puits de carbone géologique peut permettre de fortement contribuer à tout cela.

Divers schémas de captage et de stockage de CO<sub>2</sub> peuvent être imaginés, il faut donc élaborer le

schéma le plus adapté au territoire. On peut penser par exemple à capter le CO<sub>2</sub> de tous les émetteurs géographiquement proches, comme dans un bassin industriel, pour le transporter par la même canalisation jusqu'à un même stockage. On peut aussi penser à avoir plusieurs petits stockages plutôt qu'un gros et unique stockage. Et si aucune possibilité de stockage ne semble possible sur le territoire, aller le stocker dans une région ou pays où cela est possible, comme sous la mer du Nord. Ou bien trouver des voies pour utiliser ce CO<sub>2</sub>. Depuis longtemps le CO<sub>2</sub> est utilisé pour faire des boissons gazeuses, des extincteurs, comme réfrigérant, solvant, etc. Depuis quelques années des recherches sont menées pour trouver d'autres voies de valorisation du CO<sub>2</sub>, en l'utilisant comme matière première pour fabriquer de nouveaux produits (matériaux, plastiques, carburants synthétiques...). Cela pourrait permettre de catalyser le développement des technologies de captage de CO<sub>2</sub> et du CSC, du fait notamment des revenus économiques générés. On parle alors, pour toute la chaîne de valeur, de CSCV (avec valorisation, ou CCUS en anglais). Cependant on ne pourra utiliser qu'une petite partie du CO<sub>2</sub> émis (< 5%) et beaucoup de ces produits ne font que retarder l'émission, car leur durée de vie est souvent courte. Le stockage est donc indispensable pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> à un niveau compatible à ce qui est requis pour la lutte contre le changement climatique.

Les stockages de CO<sub>2</sub> pourraient être pensés pour récupérer par la même occasion de la chaleur géothermique contenue dans les couches géologiques profondes, afin d'alimenter un réseau de chaleur ou une industrie proche, comme étudié par exemple dans le projet GEOCO<sub>2</sub> mentionné ci-dessus. La température du sous-sol augmente naturellement avec la profondeur, par exemple à 2 km de profondeur elle est en moyenne de 60 °C. Une configuration possible serait de doter un doublet géothermique d'une fonction de stockage de CO<sub>2</sub>. La France maîtrise bien le système du doublet géothermique en aquifère salin profond, il y en a notamment plus de quarante en fonctionnement dans le bassin parisien depuis les années 1970. Le principe est de pomper l'eau chaude présente dans l'aquifère profond par un forage producteur, puis de réinjecter l'eau refroidie dans ce même aquifère par un forage injecteur après en avoir récupéré la chaleur. Dans de nouveaux doublets géothermiques spécialement conçus à cet effet, il pour-

rait être envisagé d'injecter du CO<sub>2</sub> avec l'eau refroidie, en l'ayant au préalable dissous dans cette eau. Tout le CO<sub>2</sub> serait alors stocké sous forme dissoute, il n'y aurait pas de CO<sub>2</sub> stocké sous forme dense. On n'aurait alors plus besoin d'avoir une roche couverture pour prévenir tout risque de remontée du CO<sub>2</sub> vers les formations géologiques supérieures, comme dans l'approche "classique" d'un stockage de CO<sub>2</sub>. Mais la quantité de CO<sub>2</sub> injectable est physiquement limitée par la solubilité du CO<sub>2</sub> dans l'eau, donc cette solution ne serait adaptée que pour de petits émetteurs industriels dispersés sur le territoire. Il est important de noter que l'acidification de l'eau liée à la dissolution du CO<sub>2</sub> est fortement atténuée par les processus de dissolutions et précipitations minérales et ne conduit pas à la création d'une cavité souterraine.

D'autres synergies sont possibles avec les énergies renouvelables. Si le couplage du stockage de CO<sub>2</sub> avec la géothermie devrait offrir la possibilité de production renouvelable de chaleur, son couplage avec la biomasse énergie devrait permettre de pomper activement le CO<sub>2</sub> atmosphérique, ce qu'on appelle des scénarios à émissions négatives [GIEC, 2019, Hilaire et al., 2019]. Par ailleurs, un des moyens envisagés pour résoudre le problème du stockage de l'électricité en excès produite par les énergies renouvelables intermittentes (éolien, photovoltaïque) est de faire de l'électrolyse de l'eau pour former de l'hydrogène et de le combiner avec du CO<sub>2</sub> capté pour produire des hydrocarbures synthétiques (méthane, méthanol, gazoline, DME...), qui sont facilement transportables, distribuables et stockables en utilisant la plupart du temps les infrastructures existantes, et qui viendraient en substitution des ressources fossiles primaires. Le CSC pourra donc être utile non seulement pour décarboner les sources d'émissions fixes, mais aussi les émissions diffuses des secteurs du transport ou de l'habitat.

Le déploiement de l'hydrogène, dont on pense qu'il jouera un rôle majeur dans la transition énergétique pour décarboner l'industrie, le transport et le chauffage des bâtiments, pourrait aussi être facilité par la technologie CSC. L'hydrogène est considéré comme le vecteur d'énergie propre par excellence, car sa combustion ne génère que de l'eau. Mais le premier défi est d'arriver à le produire en grandes quantités. L'un des moyens envisagés est de

le produire par électrolyse de l'eau à partir des énergies renouvelables, dont la part dans le mix énergétique ne cessera d'augmenter à l'avenir (cet hydrogène est dit « vert »). D'importantes recherches sont menées dans ce but. L'hydrogène qui est aujourd'hui principalement utilisé par l'industrie est produit à 95% à partir de combustibles fossiles (charbon, gaz naturel) - cet hydrogène est dit « gris ». Sa production génère donc du CO<sub>2</sub>, mais si on le capte pour le stocker sous terre, on pourrait produire par ce biais-là de grandes quantités d'hydrogène décarboné (cet hydrogène est dit « bleu »). Dans ce schéma, les émissions de CO<sub>2</sub> auparavant diffuses sur le territoire seraient concentrées en un point, celui où l'hydrogène est produit, où elles pourraient être captées et stockées, décarbonant ainsi toute la chaîne des usages ultérieurs. Cet hydrogène décarboné via le stockage de CO<sub>2</sub> devrait faciliter le déploiement de l'hydrogène dans le mix énergétique de demain, en attendant que l'hydrogène vert soit en mesure de prendre le relais, ou en appoint à l'hydrogène vert.

L'hydrogène peut être injecté dans les infrastructures gazières, avec un taux de quelques pourcents, afin de décarboner progressivement le contenu des réseaux de distribution de gaz naturel et les usages associés. Ce taux pourrait être augmenté ultérieurement moyennant des adaptations des réseaux. Des infrastructures spécifiques de transport et de stockage de l'hydrogène sont aussi envisagées. Par exemple, le projet « H21 North of England » vise la conversion totale du réseau de gaz naturel du Nord de l'Angleterre en réseau 100% hydrogène, afin de décarboner les habitations (chauffage domestique, cuisine), les industries et le transport [Northern Gas Networks, and Cadent, and Equinor, 2018]. Ce projet prévoit de produire de l'hydrogène bleu à partir de gaz naturel avec stockage de CO<sub>2</sub> sous la mer du Nord et stockage d'H<sub>2</sub> en cavités salines sur le continent en Angleterre.

## 10. Conclusion

La lutte contre le changement climatique et la transition énergétique et écologique sont intimement liées. Il faut agir pour pouvoir enrayer les grands problèmes liés au climat, à la perte de la biodiversité et aux pollutions diverses, qui se vivent maintenant à l'échelle de la planète. Mais il est très

complexe d'appréhender quelles actions mener du fait des multiples interrelations entre les activités humaines. Il est important que les actions soient menées en cohérence les unes par rapport aux autres et que les solutions mises en œuvre soient les plus efficaces possibles pour atteindre les objectifs, mais aussi les plus économiques et les plus justes socialement. Toutes les solutions et combinaisons de solutions doivent donc être étudiées, sans a priori. Remettre le carbone dans le sous-sol d'où il a été extrait offre un moyen efficace pour réduire les émissions résiduelles incompressibles de CO<sub>2</sub> et même pour retirer du CO<sub>2</sub> qui est déjà dans l'atmosphère. Une boucle vertueuse pour l'environnement et le climat. C'est le puits de carbone géologique, qui consiste à imiter la nature en créant des stockages de CO<sub>2</sub> analogues aux nombreux gisements naturels de CO<sub>2</sub>.

## Références

- ADEME (2011). Le captage, transport, stockage géologique et la valorisation du CO<sub>2</sub>. Feuille de route stratégique.
- ADEME, BRGM, and IFP (2007). *Capter et stocker le CO<sub>2</sub> dans le sous-sol : une filière technologique pour lutter contre le changement climatique*. Les enjeux des géosciences. Éditions du BRGM.
- AIE (Agence Internationale de l'Énergie) (2019). *Exploring Clean Energy Pathways : The Role of CO<sub>2</sub> Storage*.
- Bouc, O., Fabriol, H., Brosse, E., Kalaydjian, F., Farret, R., Gombert, P., Berest, P., Lagneau, V., Pereira, J.-M., and Fen-Chong, T. (2012). Lignes de conduite pour la sécurité d'un site de stockage géologique de CO<sub>2</sub>. Rapport BRGM/RP-60369-FR, 154 p., 3 annexes.
- CCNUCC (Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques) (2015). Accord de Paris. 28 p.
- CESE (Conseil Economique Social et Environnemental) (2020). Accord de Paris et neutralité carbone en 2050 : comment respecter les engagements de la France? Résolutions. 39 p.
- Club CO<sub>2</sub> (2015). Recommandations. Paris 2015 — COP21. Réchauffement climatique et gestion du CO<sub>2</sub>. 8 p.
- CO<sub>2</sub>GeoNet (2008). Que signifie vraiment le stockage géologique de CO<sub>2</sub>? 20 p.



- Commission européenne (2020). Proposition de règlement du Parlement européen et du Conseil établissant le cadre requis pour parvenir à la neutralité climatique et modifiant le règlement (UE) 2018/1999 (loi européenne sur le climat). 49 p.
- Czernichowski-Lauriol, I. (2020). Comment développer un puits de carbone en stockant le CO<sub>2</sub> sous terre? In Aurias, A., Lehoucq, R., Suchet, D., and Vincent, J., editors, *Nos Futurs, Imaginer les Possibles du Changement Climatique*, pages 431–465. ActuSE Chambéry, France.
- Czernichowski-Lauriol, I., Arts, R., Durand, D., Durucan, S., Johannessen, P., May, F., Olivier, M.-L., Persoglia, S., Riley, N., Sohrabi, M., Stokka, S., Vercelli, S., and Vizika-Kavvadias, O. (2009). CO<sub>2</sub>GeoNet, the unique role of the European scientific body on CO<sub>2</sub> geological storage. *Energy Procedia*, 1 :2043–2050.
- Czernichowski-Lauriol, I., Berenblyum, R., Bigi, S., Car, M., Liebscher, A., Persoglia, S., Poulsen, N., Stead, R., Vercelli, S., Vincent, C., and Wildenborg, T. (2017). CO<sub>2</sub>GeoNet Perspective on CO<sub>2</sub> Capture and Storage : A Vital Technology for Completing the Climate Change Mitigation Portfolio. *Energy Procedia*, 114 :7480–7491.
- Czernichowski-Lauriol, I., Pauwels, H., Vigouroux, P., and Le Nindre, Y. M. (2002). The French carbogaseous province : an illustration of natural processes of CO<sub>2</sub> generation, migration, accumulation and leakage. In Gale, J. and Kaya, Y., editors, *Proceedings of the GHGT-6 International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies, Kyoto, Japan, 01-04/10/2002*, volume I, pages 411–416. Elsevier Ltd.
- ENOS (2017). Participating in CO<sub>2</sub> geological storage research. H2020 ENOS project, 29 p.
- Gastine, M., Berenblyum, R., Czernichowski-Lauriol, I., de Dios, J., Audigane, P., Hladik, V., Poulsen, N., Vercelli, S., Vincent, C., and Wildenborg, T. (2017). Enabling Onshore CO<sub>2</sub> Storage in Europe : Fostering International Cooperation Around Pilot and Test Sites. *Energy Procedia*, 114 :5905–5915.
- GCCSI (Global Carbon Capture and Storage Institute) (2019). The Global Status of CCS : 2019. 84 p.
- GCCSI (Global Carbon Capture and Storage Institute) (2020a). Scaling up the CCS market to deliver net-zero emissions. 20 p.
- GCCSI (Global Carbon Capture and Storage Institute) (2020b). The US Section 45Q Tax Credit for Carbon Oxide Sequestration : An Update. Brief, 7 p.
- GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) (2005). Carbon Dioxide Capture and Storage. Rapport spécial, 443 p.
- GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) (2019). Réchauffement planétaire de 1,5 °C. Résumé à l'intention des décideurs. Rapport spécial, 32 p.
- Hilaire, J., Minx, J., Callaghan, M., Edmonds, J., Luderer, G., Nemet, G., Rogelj, J., and del Mar Zamora, M. (2019). Negative emissions and international climate goals—learning from and about mitigation scenarios. *Clim. Change*, 157 :189–219.
- Holloway, S., Heederik, J., van der Meer, L., Czernichowski-Lauriol, I., Harrison, R., Lindeberg, E., Summerfield, I., Rochelle, C., Schwarzkopf, T., Kaarsatd, O., and Berger, B. (1996). The Underground Disposal of Carbon Dioxide. Summary report of the Joule II project No. CT92-0031, S. Holloway (ed.). British Geological Survey, Keyworth, Nottingham, UK, 24 p.
- Kervévan, C., Beddelem, M.-H., Galiègue, X., Le Gallo, Y., May, F., O'Neil, K., and Sterpenich, J. (2017). Main Results of the CO<sub>2</sub>-DISSOLVED Project : First Step toward a Future Industrial Pilot Combining Geological Storage of Dissolved CO<sub>2</sub> and Geothermal Heat Recovery.
- MESRI (Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation) (2018). Stratégie nationale des Infrastructures de recherche. 165 p.
- Mission Innovation (2017). Accelerating Breakthrough Innovation in Carbon Capture, Utilization, and Storage. 291 p.
- Mission Innovation (2019). Report of the Mission Innovation Carbon Capture, Utilization and Storage Experts' Workshop, Trondheim, Norway, June 19-20, 2019. 31 p.
- MTES (Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire) (2020). Stratégie nationale bas-carbone. La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone. 192 p.
- Northern Gas Networks, and Cadent, and Equinor (2018). H21 North of England. H21 NoE Report/2018, 544 p.
- Pearce, J., Czernichowski-Lauriol, I., Lombardi, S., Brune, S., Nador, A., Baker, J., Pauwels, H., Hatzizannis, G., Beaubien, S., and Faber, C. (2004). A review of natural CO<sub>2</sub> accumulations in Europe as analogues for geological sequestration. *Geological*

- Society London, Special Publications*, 233(1) :29–41.
- République française (2019). Loi n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat. *Journal Officiel* n° 0261 du 09/11/2019, 34 p.
- SET-Plan (2017). SET-PLAN TWG9 CCS and CCU Implementation Plan. 48 p.
- TOTAL (2013). Captage-Stockage de CO<sub>2</sub> — Pilote de Lacq. Bilan et perspectives. 25 p.
- Union Européenne (2009). Directive européenne 2009/31/CE du 23 avril 2009 relative au stockage géologique du dioxyde de carbone. *Journal officiel de l'Union européenne* du 05/06/2009, 22 p.
- ZEP (Zero Emission Platform) (2015). CCS for industry. Modelling the lowest-cost route to decarbonising Europe. 45 p.





---

Facing climate change, the range of possibilities / *Face au changement climatique, le champ des possibles*

# Les batteries sont-elles la bonne option pour un développement durable ?

*Are batteries the right option for a sustainable development ?*

Jean-Marie Tarascon<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Chimie du Solide et de l'Énergie, Collège de France, UMR CNRS 8260, Paris, France

Courriel: [jean-marie.tarascon@college-de-france.fr](mailto:jean-marie.tarascon@college-de-france.fr)

**Résumé.** Les enjeux liés au stockage de l'énergie ont conduit, au cours de cette dernière décennie, à un foisonnement scientifique donnant naissance à des innovations spectaculaires dans le domaine des batteries. Ces innovations font aujourd'hui de la mobilité électrique une réalité et vont également faciliter le déploiement des énergies renouvelables. Dans le contexte du déploiement massif de batteries attendu, il est légitime de se demander quelle sera la batterie du futur et, en particulier, si cette batterie sera la bonne option pour un développement durable. Il s'agit d'un challenge énorme qui peut conduire à une myriade d'opportunités. C'est ce à quoi ce manuscrit va tenter de répondre en se penchant sur de nombreux aspects de la recherche. Nous traiterons en effet de l'amélioration des performances — en termes d'autonomie, de durabilité et de sécurité — du développement de batteries plus éco-compatibles, voire plus intelligentes, reposant sur de nouvelles chimies à base de matériaux abondants, ou encore de procédés de recyclage innovants ou d'injections de fonctionnalités de diagnostic-autoréparation. Face à ce champ des possibles, optimisme et enthousiasme doivent prévaloir sur la morosité afin d'encourager nos jeunes talents à prendre part à cette aventure passionnante.

**Abstract.** The challenges related to energy storage have led, over the past decade, to a scientific proliferation giving birth to spectacular innovations in battery research. They have contributed in making today's electric mobility a reality, and have been key enablers in the deployment of renewable energies. However, it is legitimate to wonder what will be the battery of the future and, in particular, if this battery will be the right option for sustainable development. This is what this manuscript addresses by discussing many aspects of battery research enlisting performances improvements in terms of autonomy, durability and safety. Moreover it presents on ongoing strategies aiming towards the development of more eco-compatible and smarter batteries, based either on new chemistries enlisting abundant metals (Na-ion), on innovative recycling processes or on the injections of smart sensing and self-healing functionalities. Such a diversity of fundamental scientific challenges emerging from concrete technological bottlenecks generates a myriad of fascinating opportunities to arouse new generation of talented students to take part in this exciting adventure.

**Mots-clés.** Batteries, Énergie, Stockage, Lithium, CO<sub>2</sub>.

Available online 14th December 2020

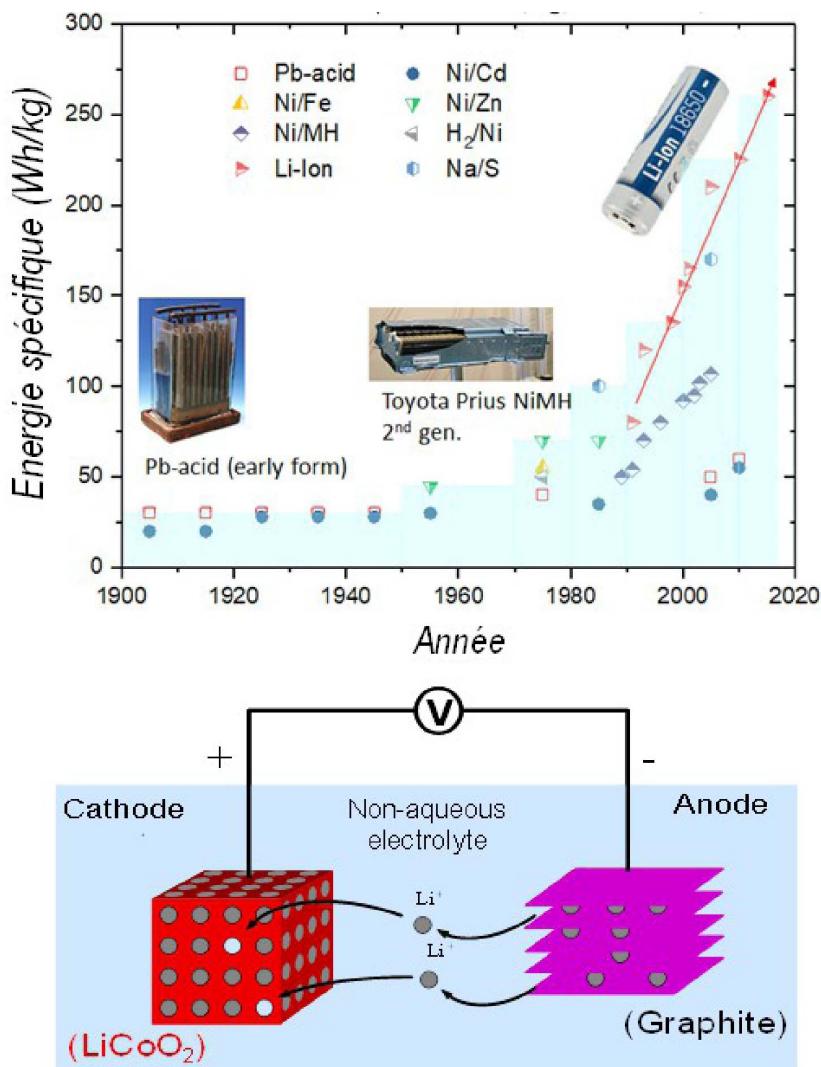
## 1. Introduction

Le réchauffement de la planète, les réserves limitées en combustibles fossiles et la pollution des villes (les transports sont responsables de 30% des émissions de CO<sub>2</sub>) montrent le besoin urgent de passer d'une économie basée sur le pétrole à une économie basée sur une énergie à faible teneur en carbone. Un tel besoin plaide pour la recherche de nouvelles sources d'énergie plus respectueuses de l'environnement, comme les énergies renouvelables (solaires, éoliennes, géothermie, biomasse...) à faible empreinte CO<sub>2</sub>. Il est important de souligner que certaines de ces énergies sont très abondantes : par exemple, le soleil envoie vers notre planète 10 000 fois plus d'énergie que ce dont nous avons besoin. Des avancées technologiques spectaculaires dans le développement de cellules photovoltaïques ont permis de mieux maîtriser la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique avec des rendements élevés ( $\geq 20\%$ ) et un coût faible ( $\leq 3$  US cents par kWh). Cette énergie est ainsi devenue compétitive par rapport aux énergies conventionnelles comme le charbon ou le nucléaire. Les sources d'énergies renouvelables sont cependant intermittentes, ce qui entraîne de larges fluctuations. Bien évidemment, ni le vent ni le soleil ne soufflent ou ne brillent sur commande. Il est donc nécessaire de coupler les systèmes de conversion de l'énergie à des systèmes de stockage de cette énergie, afin de pouvoir générer après coup, sur demande, l'électricité voulue. De façon similaire, la transition irréversiblement amorcée des véhicules thermiques vers les véhicules électriques nécessite une énergie embarquée suffisante capable d'assurer l'autonomie du véhicule, ce qui requiert, là encore, des systèmes de stockage performants. Le défi majeur des vingt prochaines années ne sera donc pas seulement un problème de conversion de l'énergie, mais aussi un problème de stockage, étape indispensable pour mieux gérer les ressources en énergie de notre planète.

L'une des façons les plus efficaces de stocker de l'énergie et de la restituer sur demande est de convertir de l'énergie chimique en énergie électrique via des dispositifs électrochimiques comme les piles à combustibles et les batteries. Parmi ces dernières, la technologie Li-ion suscite aujourd'hui un fort engouement médiatique en raison de performances attractives défiant celles des technologies antérieures

(Pb-acide, Ni-Cd ou Ni-MH à base d'électrolytes aqueux) (Figure 1a). À titre de comparaison, la densité d'énergie (Wh/kg) des batteries Li-ion est de trois à cinq fois supérieure en moyenne à celles des autres technologies. Les batteries Li-ion reposent sur l'utilisation de matériaux d'insertion (éponges à Li<sup>+</sup>) comme électrodes positives et négatives, séparés par un électrolyte organique à base de sels de lithium qui assure le cheminement des ions entre les deux électrodes tout en étant un isolant électrique (Figure 1b). Quant aux électrons fournis lors de la connexion des pôles positifs et négatifs de la batterie, ils proviennent de réactions d'oxydo-réduction se produisant en tandem aux électrodes. Ces réactions impliquent l'insertion/désinsertion d'ions Li<sup>+</sup> au sein de la structure hôte du matériau d'électrode avec une injection/consommation concomitante d'électrons. La structure électronique (position du niveau de Fermi) et cristallographique du matériau d'électrode (nombre de sites vacants pour accueillir les ions Li<sup>+</sup>) régit respectivement son potentiel redox et sa capacité électrique. Ces caractéristiques associées au pouvoir extrêmement réducteur du lithium (-3.09 V/ESH) font que le passage d'un électrolyte aqueux à un électrolyte organique permet d'obtenir une tension de batterie 3 fois supérieure, ainsi qu'une densité d'énergie (Wh/kg) [produit du potentiel (V) en volts et de la capacité (Ah/kg)] pouvant atteindre 240 Wh/kg ou 500 Wh/l. En comparaison, la densité d'énergie de la technologie Pb-acide, vieille de 200 ans, atteint aujourd'hui environ 40 Wh/kg.

Cette lenteur des progrès dans le domaine des batteries contraste avec l'augmentation exponentielle du nombre de transistors pouvant être intégrés à des microprocesseurs, régie par la célèbre loi de Moore (doublement de densité des transistors tous les deux ans). D'ailleurs, à titre indicatif, où en serions-nous si les capacités des batteries avaient suivi une évolution similaire à celle décrite par la loi de Moore? Si nous prenons la batterie Pb-acide (G. Planté — 1860) comme point de départ, l'énergie stockée par 1kg de batterie aurait dû égaler en 1908 l'énergie de la première bombe atomique, alimenter de manière continue l'humanité en énergie pendant 1h20 en 1950 et pendant 50 000 ans en 2006. Hélas, il n'en fut pas ainsi, car ce domaine de recherche est fortement tributaire des caprices de la chimie et du nombre d'électrons, malheureusement limité, pouvant être extraits réversiblement d'une liaison

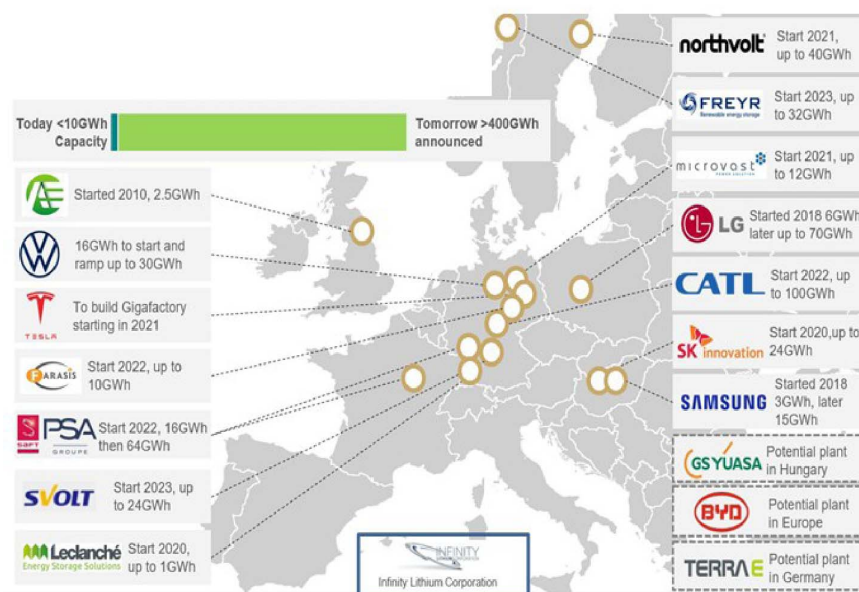
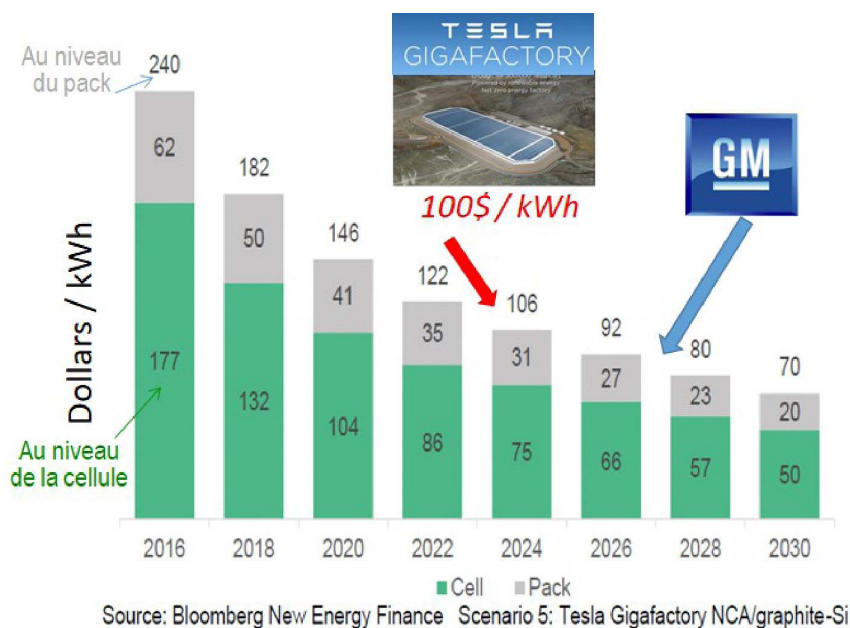


**FIGURE 1.** Évolution de l'énergie spécifique pour différentes technologies des batteries en fonction du temps (haut) et principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion (bas).

chimique. Le triplement de la densité d'énergie de la technologie Li-ion en 30 ans a donc été un travail de longue haleine [Tarascon, 2016] qui a commencé dès 1950. Les pionniers de ces travaux, J.B. Goodenough, M. S. Whittingham et A. Yoshino, ont reçu le prix Nobel 2019 de Chimie pour avoir identifié les matériaux d'électrodes et les électrolytes présents aujourd'hui encore dans les batteries à ions Li. Le succès de cette technologie est telle que ces batteries sont vues comme l'un des nerfs de la guerre pour

le développement rapide de véhicules électriques et, à plus long terme, pour le stockage — et donc l'utilisation massive — des énergies renouvelables.

En dehors des prix Nobel, un autre homme clé, Elon Musk, a joué un rôle essentiel dans la révolution que connaît aujourd'hui le monde des batteries. Visionnaire hors pair au parcours atypique venant du monde de l'ingénierie et des affaires (fondateur de Zip2, SpaceX, CEO de SolarCity puis de Tesla), il s'est engagé mondialement en avril 2015 à mettre à dispo-



**FIGURE 2.** Évolution du prix du kWh stocké au fil des années (haut) et sites de construction des nombreuses « gigafactories » planifiées en Europe (bas).

sition de tous les êtres humains, où qu'ils habitent, de l'énergie propre en grande quantité et à bas coût grâce aux batteries. Il lança ainsi la construction de la première usine de fabrication de batteries d'une capacité de plusieurs dizaines de Gigawatt-heure, appelée *gigafactory*, dans le Nevada (USA) ayant une ca-

pacité annuelle de production de 5 milliards de cellules. L'usine est en plus alimentée en majeure partie par l'énergie solaire. Ainsi, sur la base de ces annonces et réalisations, le prix du kWh stocké a été divisé par 10 sur les dix dernières années avec l'objectif de passer en dessous des 100 € d'ici 2025 (Figure 2a).

Tout ceci, associé à l'amélioration constante de la chimie, explique le boom actuel de l'industrie des véhicules électriques, avec plus de 400 modèles pour 2019, la batterie Li-ion constituant la clef de voûte de cette technologie.

La vision d'E. Musk se propage et de telles usines de batteries voient le jour partout dans le monde comme chez les géants asiatiques ou en Europe à travers l'Alliance Européenne des Batteries qui souhaite assurer pour l'industrie automobile de pointe de l'Union une indépendance énergétique. La première *gigafactory* européenne a vu le jour en Suède et une dizaine d'autres sont planifiées (Figure 2a) avec notamment un projet franco-allemand qui prévoit deux usines, une en Allemagne et l'autre en France, en s'appuyant sur les industriels européens du domaine (SAFT, Solvay, Siemens et autres). Ainsi, la quantité totale d'énergie stockée par des batteries Li-ion en Europe devrait au minimum passer de 10 GWh à 400 GWh lors de la prochaine décennie. Ce développement de la mobilité électrique est un atout pour diminuer notre empreinte CO<sub>2</sub>, à la condition *sine qua non* que l'énergie électrique rechargeant ces batteries provienne d'énergies renouvelables voire des centrales nucléaires et non de centrales thermiques à charbon (grandes émettrices de CO<sub>2</sub>).

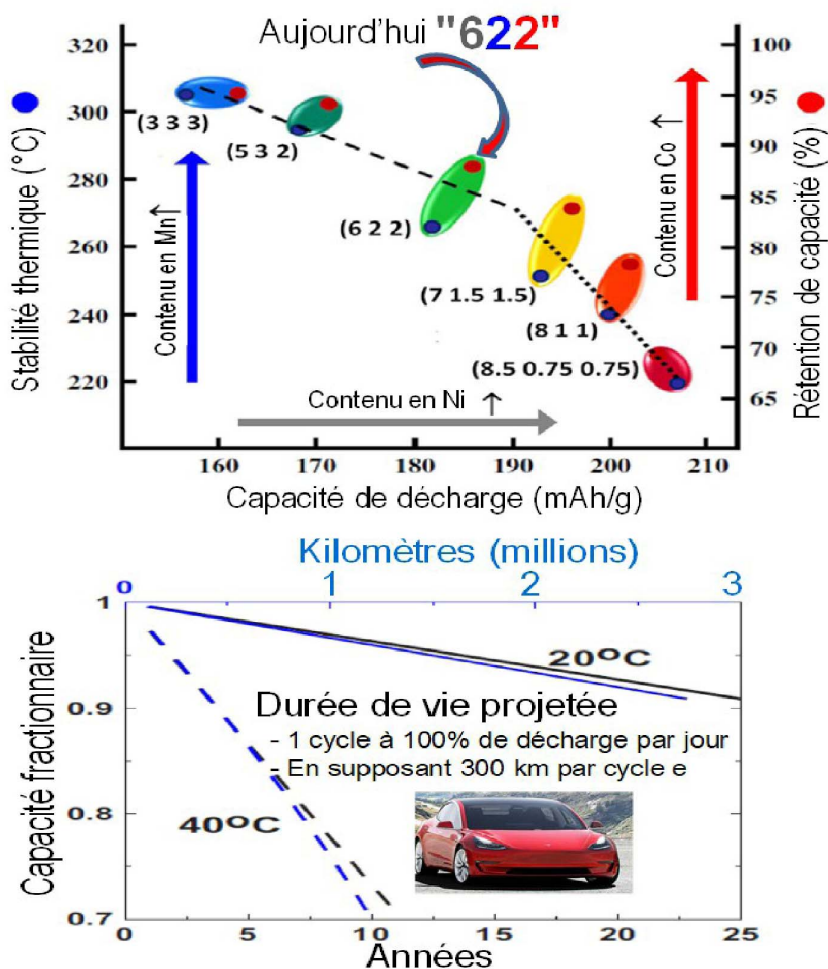
Bien que dominante, la technologie à Li-ion, commercialisée depuis 1990, est encore perfectible, notamment au niveau de sa densité d'énergie, de sa durée de vie, de sa sécurité et de son empreinte environnementale. Tous ces aspects font des batteries un sujet de recherche diversifié, passionnant et innovant. Le format de cet article fait que je ne pourrai pas exposer tous les travaux actuels et passés sur les batteries. Les travaux décrits ci-après ont donc été choisis afin de donner un aperçu des recherches actuelles fondamentales, appliquées et futuristes visant (i) à augmenter la densité d'énergie de la technologie Li-ion via de nouveaux concepts de matériaux, (ii) à concevoir des batteries plus éco-compatibles telles que les batteries Na-ion et (iii) à développer des batteries intelligentes via l'injection de nouvelles fonctionnalités, avant d'aborder la problématique du recyclage.

### 1.1. Augmenter la densité énergétique de la technologie Li-ion

De nombreuses familles de batteries à ions Li sont actuellement développées. Elle reposent toutes sur l'utilisation de graphite comme électrode négative mais diffèrent de par la nature de l'électrode positive dont les composés les plus utilisés pour la mobilité électrique sont des oxydes de structure lamellaire  $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3})\text{O}_2$  et  $\text{Li}(\text{Ni}_x\text{Co}_y\text{Al}_{1-x-y})\text{O}_2$ , dénotés NMC et NCA respectivement [Padhi et al., 1997]. Ces batteries, en raison d'une densité d'énergie gravimétrique élevée, détrônent celles utilisant des positives à base de phosphates ( $\text{LiFePO}_4$ ) qui sont plus attractives en termes de sécurité et d'impacts environnementaux. Cependant, une inquiétude liée aux électrodes NMC et NCA repose sur leur taux élevé en Co, un élément chimique très peu abondant dont l'extraction minière soulève des problèmes éthiques. Les matériaux d'électrodes à faibles taux de Co deviennent de plus en plus prisés. Les acteurs du domaine développent des phases lamellaires [Rozier and Tarascon, 2015] de type 811, (ces chiffres désignant les proportions de Ni/Mn/Co dans le matériau :  $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,1}\text{Ni}_{0,1}\text{O}_2$ ) plus appauvries en Co que les phases 622 ( $\text{LiNi}_{0,6}\text{Co}_{0,2}\text{Ni}_{0,2}\text{O}_2$ ) actuellement commercialisées (Figure 3a), ainsi que de nouvelles phases riches en lithium de type  $\text{Li}(\text{Li}_{1,2}\text{Ni}_{0,3}\text{Co}_{0,13}\text{Mn}_{0,54}\text{O}_2)$  [Lu and Dahn, 2002, Thackeray et al., 2007] qui, outre le faible taux de Co, présentent des capacités exacerbées. Ces dernières phases dont la capacité repose sur un nouveau concept de redox anionique mis à jour pour la première fois dans le groupe que je dirige au Collège de France [Assat and Tarascon, 2018, Sathiya et al., 2013] laissent espérer une augmentation de 20% de la densité gravimétrique de la cellule. Cependant, des verrous technologiques liés aux chutes de potentiel lors du cyclage ainsi qu'à des problèmes d'hystérésis influençant négativement les performances en puissance et en efficacité énergétique de ces matériaux restent à lever pour concrétiser commercialement ces nouveaux matériaux riches en Li [Assat and Tarascon, 2018].

Les interfaces électrodes-électrolytes qui gouvernent les performances en puissance, durabilité et vie calendaire font également l'objet d'études intenses. Le défi est de taille en raison des évolutions dynamiques de ces interfaces durant le cyclage et du



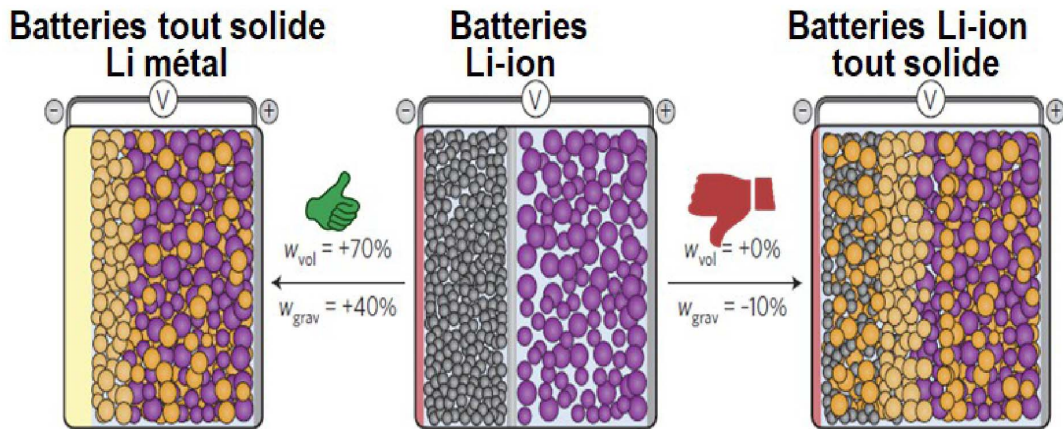


**FIGURE 3.** Oxydes lamellaires à faible teneur en cobalt pour les prochaines générations de batteries pour véhicules électriques (gauche). À ce jour la composition  $\text{LiN}_{i0.6}\text{Mn}_{0.2}\text{Co}_{0.2}\text{O}_2$  (622) est la plus utilisée. Une estimation, déduite de tests accélérés sur 3 ans (voir texte) sur des batteries Li-ion à base d'un oxyde (532), laisse présager d'une durée de vie de 25 ans à 20 °C et d'une distance cumulée de 3 millions de km en supposant une décharge de 100% et 300 km par cycle.

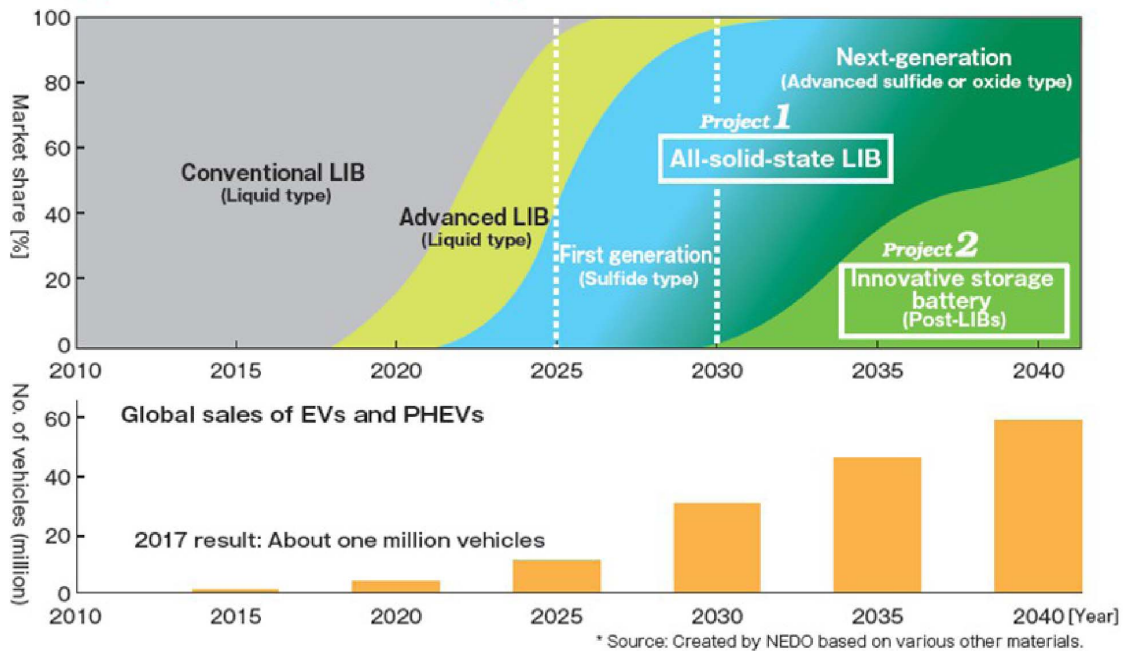
vieillesse de la batterie. Cependant, grâce à des recherches affinées sur la stabilisation d'électrolytes via l'ajout d'additifs combinées au développement de techniques operando de caractérisation jouissant d'une excellente résolution en temps et en espace, nous maîtrisons aujourd'hui ces interfaces comme jamais. La durée de vie des batteries a ainsi pu être améliorée. D'ailleurs, une étude récente [Harlow et al., 2019] de trois années de tests sur des cellules Li-ion de type NMC(532)/C, à des températures variées, montre que la durée de vie des batteries des

véhicules électriques pourrait leur permettre d'atteindre 3 millions de kilomètres parcourus à 20 °C, soit une durée de vie de 25 ans en supposant une décharge de 100% par jour (Figure 3b). De plus, sur la base des progrès effectués au niveau des oxydes lamellaires avec l'apport des composés riches en Li ainsi que sur l'électrode de C par ajout de Li, l'obtention de densité d'énergie autour de 700–800 Wh/l et de 350–400 Wh/kg est envisagée pour 2025.

Néanmoins, la question de savoir si nous serons capables d'aller au-delà des 800Wh/l demeure. Beau-



### Long-term forecast of technology and market for automotive batteries



**FIGURE 4.** Avantages du tout solide avec une anode de Li métal par rapport au Li-ion liquide et solide (haut) et au milieu et en bas les prévisions à long terme du Japon pour la technologie tout solide ainsi qu'une estimation (bas) des ventes globales de véhicules électriques et hybrides.

coup d'espoir repose sur les batteries dites « tout solide » qui suscitent un engouement dans le monde des fabricants de voitures électriques. Par exemple, Toyota annonçait déjà en 2017 qu'il prévoyait de concurrencer les voitures Tesla dès 2022 avec des batteries de ce type à charge rapide. Il s'agit là d'une renaissance pour cette technologie qui a été développée initialement par J. Akridge à Eveready® en 1986

[Jones and Akridge, 1992] dans une version couche mince ( $\text{TiS}_2/\text{LiPON-LiI/Li}$ ). C'est la découverte par Kanno en 2011 [Kanno and Murayama, 2001] du thio-phosphate  $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$  présentant une conductivité ionique exceptionnellement élevée de  $10^{-2} \text{ S/cm}^2$ , comparable, voire supérieure, à celle d'un électrolyte liquide, qui relança l'intérêt pour les batteries tout-solide. Ce fut un vrai déclic, au point qu'il est difficile

de trouver un laboratoire, un fabricant de batteries ou un constructeur automobile qui, aujourd'hui, ne travaille pas sur les batteries tout solide. Ces batteries sont sur la feuille de route de toutes les institutions et compagnies asiatiques, dont le Japon, qui anticipe une pénétration importante du marché automobile pour 2030 (Figure 4b). L'Europe se mobilise également avec le lancement de nombreux projets dans le cadre des programmes H-2020. Ces batteries seraient potentiellement plus sûres, en raison de l'absence d'électrolyte liquide mais aussi plus attractives en termes d'énergie volumétrique en raison de l'utilisation du Li métallique en remplacement de l'électrode négative de carbone graphite (Figure 4a) et aussi de leur possibilité d'assemblage en configuration bipolaire. Cette euphorie commence cependant à retomber par la prise de conscience croissante des difficultés récurrentes liées à l'instabilité des interfaces et notamment du fait de la fenêtre de potentiel limitée par la stabilité thermodynamique des conducteurs ioniques, que ce soient ceux de la famille des thiophosphates ( $\text{Li}_3\text{PS}_4$ ,  $\text{Li}_{10}\text{GeP}_2\text{S}_{12}$ ) ou des grenats ( $\text{Li}_7\text{La}_3\text{Zr}_2\text{O}_{12}$ ) [Thangadurai et al., 2014]. La problématique de la croissance dendritique à l'électrode de Li, qui a conduit à l'abandon de la technologie Li-métal à électrolyte liquide dans les années 80, n'est pas à ce jour entièrement résolue. La diffusion du Li qui est plus lente dans le Li métallique que dans le conducteur ionique provoque l'apparition d'une porosité à l'interface propice à la formation de ces dendrites. À ce jour, ce problème ne peut pas être totalement résolu malgré l'utilisation de traitements de surface et le maintien de la batterie sous pression mécanique. Tout aussi complexe est la maîtrise de l'interface oxyde lamellaire-conducteur ionique à l'électrode positive, tant au niveau de la compatibilité chimique de l'électrolyte solide avec le matériau d'électrode actif qu'au niveau de son élasticité pour absorber les changements de volume répétés associés à l'insertion/désinsertion du  $\text{Li}^+$ . Lever ces verrous scientifiques et technologiques reste encore un défi majeur qui focalise les efforts de nombreux groupes de recherche dans le monde. Les pistes poursuivies se concentrent autour de méthodes d'enrobage variées incluant le dépôt de couches tampons d'oxydes pour minimiser les réactions de décomposition, d'alliages pour assurer une meilleure mouillabilité de l'interface Li métal / électrolyte ou enfin de couches minces de conducteurs ioniques hybrides

(inorganique-polymère) pour assurer une élasticité de l'interface sans en affecter le transport ionique [Famprakis et al., 2019]. Bien que certaines études soient prometteuses, la problématique des interfaces au sein des batteries tout solide est loin d'être maîtrisée ce qui confère un aspect quelque peu irréaliste à certaines annonces annonçant la batterie tout solide pour 2022 (date qui a d'ailleurs déjà été repoussée). En résumé, les batteries tout solide sont prometteuses, mais la route sera longue, tant au niveau fondamental ou appliqué, avant leur commercialisation. Restons humble et ne répétons pas l'histoire de la technologie Li-air qui fut largement survendue pour être, 5 ans plus tard, totalement oubliée.

### 1.2. Conception de batteries plus éco-compatibles

Outre l'autonomie de la batterie, son éco-compatibilité revêt une importance capitale pour des raisons sociétales et planétaires. Nous serions bien naïfs de penser qu'une batterie suit parfaitement les préceptes du développement durable. Cette crainte est renforcée par des analyses du cycle de vie énergétique des batteries qui révèlent qu'une énergie de 400 kWh est nécessaire pour fabriquer une batterie Li-ion stockant 1 kWh par cycle, qui s'accompagne de l'émission d'environ 75 kg de  $\text{CO}_2$  [Larcher and Tarascon, 2015]. Un tel constat a conduit à une réorientation de nos thématiques de recherche qui se focalisent à ce jour sur l'exploration de nouveaux concepts de *design* de matériaux d'électrodes à base d'éléments abondants conçus à partir de procédés de synthèse moins énergivores. La recherche s'intéresse également au développement de nouvelles chimies, au-delà du Li, pour minimiser l'empreinte environnementale de la production des batteries. L'enjeu est aussi de répondre aux interrogations légitimes sur les réserves disponibles de lithium dans le monde, au vu de la demande croissante de cet élément par l'industrie automobile et le déploiement des énergies renouvelables. De plus, ces réserves sont situées dans un nombre limité de pays, dont certains sont géopolitiquement à risque, avec la crainte de voir le prix du Li fluctuer comme celui de l'or noir [Tarascon, 2010]. Ces inquiétudes ont conduit au développement de nouvelles technologies métal-air ( $\text{Li-O}_2$ ,  $\text{Zn-O}_2$ ), Li-S, Na-ion, Mg(Ca)-ion,  $\text{Zn-MnO}_2$  et « Redox-Flow » qui, bien que qualifiées de « nouvelles », reposent

toutes sur des chimies déjà connues, mais délaissées pour différentes raisons.

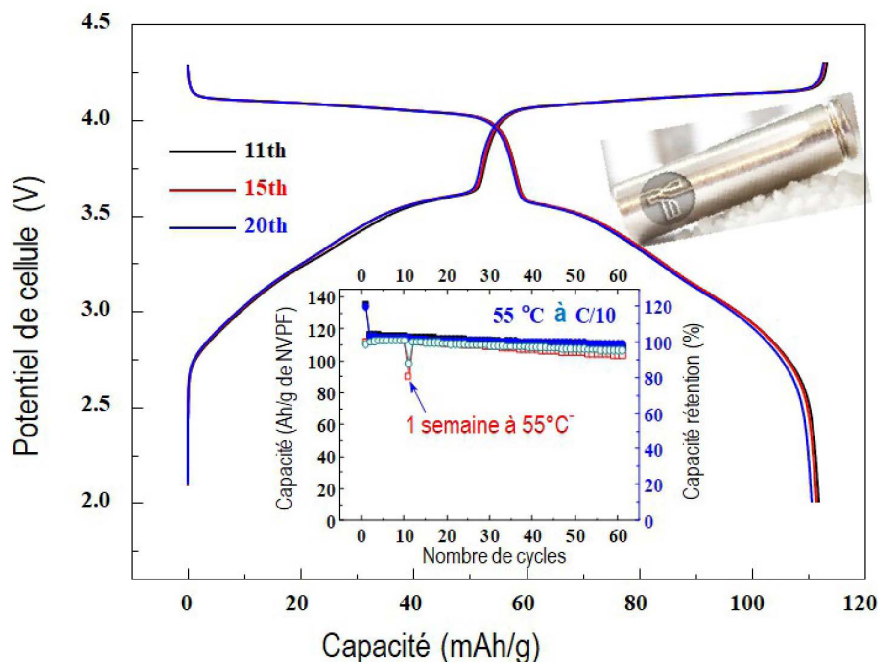
Parmi les chimies mentionnées ci-dessus, la plus mature et intéressante dans le contexte du développement durable est sans nul doute celle au sodium. En effet, les ressources en Na sont illimitées, accessibles partout dans le monde et exploitables à un coût très faible. De plus, si quelques critères notamment massiques ( $\text{Na}^+$  trois fois plus lourd que  $\text{Li}^+$ ) peuvent apparaître pénalisants, ces désavantages sont contrebalancés par la possibilité de remplacer le collecteur de courant de l'électrode négative en Cu dans la technologie à ions Li par de l'aluminium qui est plus léger, meilleur marché, et qui ne forme pas d'alliage avec le sodium. Deux technologies à ions Na sont actuellement développées. Elles partagent la même électrode négative qui est du carbone mais diffèrent par le fait que l'une utilise des composés polyanioniques  $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3$  [Ponrouch et al., 2013] et l'autre des composés lamellaires  $\text{Na}_{2/3}\text{Mn}_{0.5}\text{Fe}_{0.5}\text{O}_2$  [Yabuuchi et al., 2012] comme électrode positive. Le système  $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3/\text{C}$  Nasion, développé à ce jour au sein du Réseau français sur le stockage électrochimique de l'énergie (RS2E) est le plus attractif. Grâce à des efforts au niveau de la chimie et de la morphologie du matériau  $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3$  couplés à la confection d'électrolytes à bases d'additifs spécifiques [Cometto et al., 2019], nous avons pu obtenir en piles boutons des performances en cyclage sur un large domaine de température ( $-15\text{ }^\circ\text{C}$  à  $+55\text{ }^\circ\text{C}$ ) n'ayant rien à envier à la technologie Li-ion (Figure 5).

Cette chimie  $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3/\text{C}$  a été intégrée avec succès à des cellules 18650 au sein de la filière française Na-ion récemment créée et portée par une start-up du nom de TIAMAT. Des cellules de 120 Wh/kg avec une longue durée de vie ( $>3\ 000$  cycles) et des performances en puissance (5–10 W/kg) attractives sont à ce jour produites. Bien que la technologie Na-ion dérive de la technologie à ions Li car utilisant des types d'électrodes et d'électrolytes similaires, elle n'est pas compétitive avec le Li-ion en termes d'énergie (120 vs. 240 Wh/kg) et ce en raison du poids du Na, supérieur à celui de Li, et de son moindre caractère réducteur. Son rôle dans des applications nécessitant une densité d'énergie élevée, comme pour les véhicules électriques, sera limité. Cette faible densité d'énergie n'est cependant pas un handicap pour les applications réseaux où le vo-

lume n'est pas une contrainte. Un atout majeur de la technologie  $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3/\text{C}$  reste les performances en puissance due à la structure tridimensionnelle de  $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3$  qui possède des canaux permettant une rapide diffusion du  $\text{Na}^+$ , et ainsi, des décharges et charges complètes en moins de 5 minutes. Elle surpasse ses homologues Li-ion et rivalise même favorablement avec les batteries Li-ion à charge ultra rapide (SCIB) de TOSHIBA — la référence dans le domaine — à un coût moindre par kWh [Tarascon, 2020]. Ainsi, la batterie  $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3/\text{C}$  a définitivement un rôle clé à jouer dans l'industrie automobile pour des fonctions demandeuses en puissance (véhicule hybride 48 V, fonctions de récupération et de démarrage/arrêt) ainsi que dans le secteur des applications réseaux pour le lissage des fréquences.

Un autre aspect attractif des batteries Na-ion est qu'elles peuvent être, au contraire des batteries Li-ion, déchargées ou maintenues à zéro volt sans aucun risque d'altérer ses performances ultérieures. La raison s'explique par le fait de pouvoir utiliser des collecteurs de courant en aluminium, qui ne forment pas d'alliage avec le Na contrairement au Li avec qui ils forment un alliage. C'est pour pallier à la formation d'alliages que nous utilisons un collecteur de courant à base de Cu pour les cellules Li-ion avec cependant le risque qu'il puisse s'oxyder, lorsque les cellules sont à zéro volt et entraîner des problèmes d'explosion via la formation de dendrites de Cu. De ce fait, les cellules Li-ion ne peuvent pas être transportées en étant déchargées, au contraire des batteries Na-ion : ces dernières sont donc exemptes de toute réglementation de transport.

Pour conclure, la technologie Na-ion est en train de devenir une réalité. Cependant, cette idée n'est pas révolutionnaire. La preuve en est qu'en 1869 un écrivain visionnaire français, Jules Verne, avait déjà identifié les avantages de cette technologie de batterie dans son roman « 20 000 lieues sous les mers ». Comme écrit dans son œuvre, « Monsieur, le sodium seul est consommé et c'est la mer qui me le fournit. Je vous dirai également que les batteries au sodium doivent être considérées comme les plus énergétiques ». Bien qu'imaginée depuis bien longtemps, la technologie Na-ion n'émerge que maintenant et se présente comme une option attrayante pour des batteries plus vertes et plus durables.



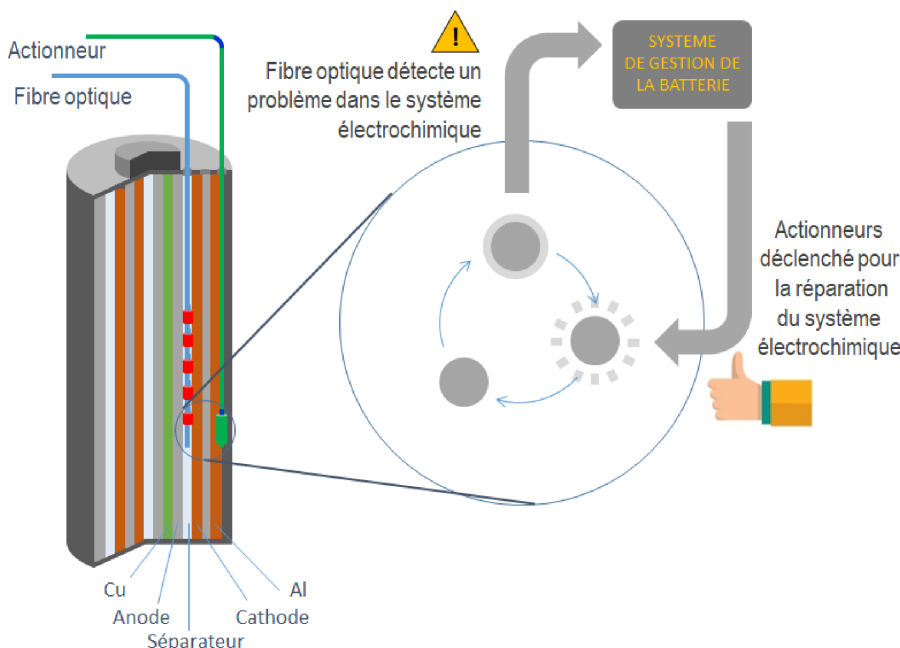
**FIGURE 5.** Performances en cyclage et en autodécharge de prototypes Na-ion 18650 basés sur l'électrochimie  $\text{Na}_3\text{V}_2(\text{PO}_4)_2\text{F}_3/\text{C}$  assemblés par la compagnie TIAMAT.

### 1.3. Vers des batteries intelligentes

Toujours afin d'abaisser l'empreinte environnementale des batteries mais aussi le coût de l'énergie stockée, beaucoup d'espoir repose sur les études visant à leur offrir une seconde vie. L'idée est que, lorsqu'elles atteignent leur fin de vie dans un véhicule électrique (avec un critère de fin de vie correspondant à une diminution de 20% de la capacité nominale), elles pourraient être, selon leur degré d'usure, remises en conformité pour des applications réseaux. Ce basculement de fonctionnalité n'est aujourd'hui qu'utopique (i) quand on voit la diversité des modèles de *packs* tous différents les uns des autres et la sophistication des systèmes de gestion de batteries (BMS) pour un usage conservatif mais sûr et (ii) en absence de traçabilité ou de possibilité d'intervenir sur l'état de santé des batteries de façon non invasive. Des méthodes de détection non-invasives visant à fournir une meilleure connaissance des processus se déroulant dans les batteries — un état de santé en quelque sorte — sont donc nécessaires pour donner une seconde vie à la batterie. Nos approches s'inspirent fortement du domaine médical. À ce titre, on

mentionnera l'introduction de fibres optiques munies de réseaux de Bragg au sein de nos accumulateurs pour obtenir par interrogation optique (déplacement de longueur d'onde du signal émis) une cartographie en température de l'intérieur de la batterie, ainsi qu'une évolution de sa pression lors de son étape de formation, de son cyclage ou de son utilisation selon des conditions de puissance élevée. Grâce à notre capacité actuelle à décrypter les informations chimiques contenues dans ces signaux optiques en termes de réactions parasites, de croissance d'interfaces et de cinétiques de réaction [Huang et al., 2020], nous pouvons peaufiner leur chimie via l'ajout d'additifs spécifiques. La collecte dans le temps de ces données nous permettra de connaître l'état de santé des batteries. On établira ainsi un « suivi médical » pour chaque batterie qui nous permettra d'en établir son degré d'usure avant de lui affecter une application de seconde vie appropriée.

Il est bien évident qu'un tel diagnostic n'a de sens, comme dans le domaine médical, que s'il va de pair avec l'auto-réparation, d'où la naissance d'une nouvelle science, à la croisée de plusieurs disciplines, vouée à l'auto-guérison des batteries en agissant au



**FIGURE 6.** Schéma conceptuel d'une batterie du futur intégrant des fonctions de diagnostic et d'auto-guérison.

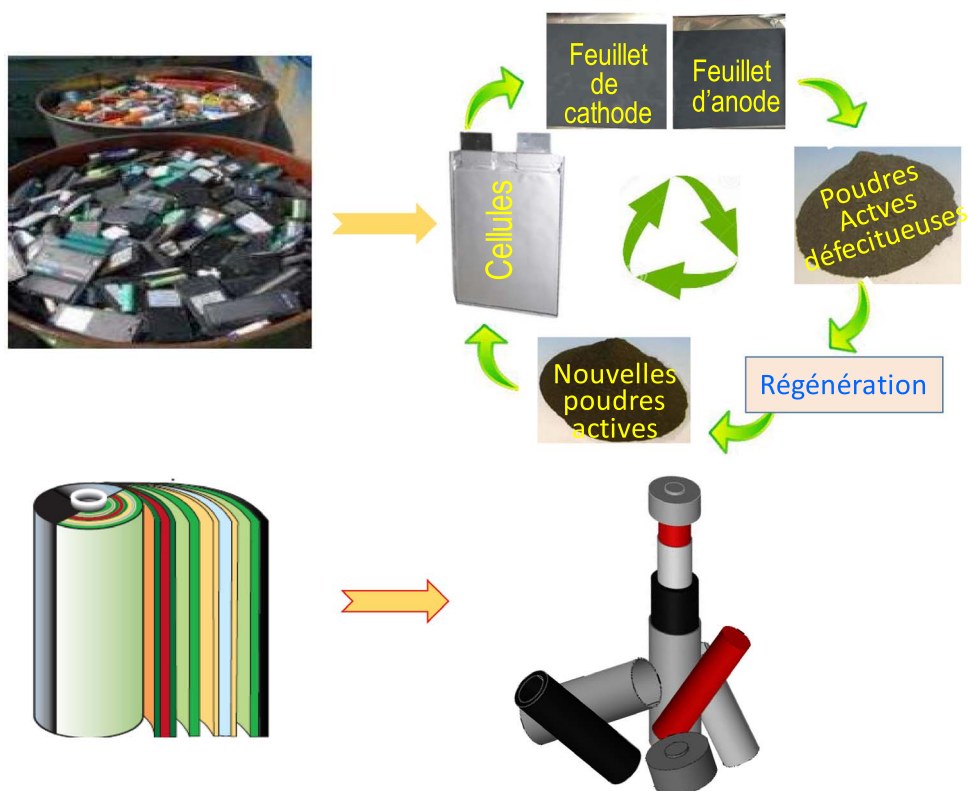
niveau des électrodes et des séparateurs via une chimie de greffage innovante. Un programme européen vient d'ailleurs de démarrer pour développer un système d'administration à la demande de molécules via des stimuli physiques pour solubiliser un dépôt résistif ou injecter des polymères auto-réparateurs opérant via des interactions supramoléculaires afin de restaurer une interface électrode/électrolyte défectueuse dans la batterie. À titre d'illustration inspirée des membranes cellulaires dotées de canaux ioniques assurant le transport membranaire dans nos cellules et agissant comme régulateurs d'ions, nous avons utilisé un canal protéique inséré dans une membrane lipidique, comme nanopore biologique pour la détection et la régulation sélective du transport d'espèces indésirables ( $S_x$ )<sup>n-</sup> au sein d'une batterie, via la formation de complexes d'inclusion avec la cyclodextrine [Bétermier et al., 2020]. De plus, les propriétés spécifiques de complexation de la cyclodextrine lui confèrent la possibilité de capter ou libérer des espèces sur un domaine étroit de température. Ainsi, la conception de membranes fonctionnalisées par CD en utilisant la température comme stimulus physique pour réguler des espèces devient du domaine du possible.

L'approche couplée diagnostic/auto-guérison est disruptive, si bien que les batteries futures pourraient avoir en dehors des pôles positifs et négatifs une sortie analytique supplémentaire (Figure 6) pour communiquer avec un BMS, qui couplé à un actuateur, pourra déclencher le stimulus souhaité pour administrer le traitement requis afin de répondre au problème identifié. Cette détection/autoréparation avancée facilitera non seulement la seconde vie des batteries mais sera également d'une valeur capitale pour en augmenter la durabilité et la fiabilité : Une façon indirecte de réduire considérablement leur empreinte environnementale.

#### 1.4. Recyclage

L'arrivée de la technologie Li-ion et des applications qui l'ont accompagnée, tant au niveau de la communication, de la mobilité électrique, des énergies renouvelables, des drones et de la médecine, est une révolution au service d'une meilleure planète. Il est cependant essentiel de ne pas refaire les erreurs du passé. On peut rappeler que les polymères, dont le plastique avec les milliers d'applications qui ont suivi sa découverte au milieu du XIX<sup>ème</sup> siècle, ont ravi





**FIGURE 7.** De la collecte (mine urbaine) au « recyclage direct » via un circuit court (haut) et en bas un assemblage repensé introduisant le concept de la batterie du futur type lego.

dans un premier temps nos sociétés, avant de devenir aujourd'hui un problème majeur en raison d'un recyclage complexe et non réalisé à ce jour. Bien que moins couverte par la presse et les médias, la chimie du recyclage, dont le libellé n'est pas très sophistiqué et attrayant, est inévitable et devient un impératif. Des milliards de batteries devront être récupérées et à ce jour, nous n'avons pas une idée claire de la façon dont cela sera fait efficacement. Le recyclage résonne parmi les scientifiques plus comme une vieille que comme une nouvelle science. Cette science repose actuellement sur des procédés pyro-ou hydro-métallurgiques à étapes multiples [Harper et al., 2019] dont la demande en énergie et en solvant devra être réduite. Il faut repenser ces procédés de recyclage et favoriser les circuits courts à une seule étape. Cependant, l'innovation est là encore possible dans ce domaine. Plusieurs équipes travaillent sur un procédé dénommé « Direct Recycling » [Chen et al., 2016] mettant en jeu une chimie préservant les élé-

ments structuraux de l'électrode de manière à permettre une simple étape de recuit (Figure 7a). Le recyclage n'aura de sens qu'avec une collecte et un système de récupération efficaces reposant sur des mines urbaines faciles et moins coûteuses à exploiter. Il est ainsi plus économique de recycler le Co des batteries que de l'extraire des mines. Dans le même esprit, nous préciserons qu'il faut seulement traiter 28 tonnes de batteries Li-ion pour récupérer une tonne de Li, alors qu'il faut manipuler 250 tonnes de spodumène (minerai contenant le Li) ou 750 tonnes de saumure pour en obtenir la même quantité [Tetgar, 2011]. La norme européenne fixant que 60% du poids de la batterie doit être récupéré ne va pas suffisamment loin. Elle devra être rehaussée avec la prise de conscience conjointe des fabricants et utilisateurs que le recyclage doit être considéré comme une valeur de la chaîne de la batterie.

En plus des procédés de recyclage [Gaines, 2018], il faut également repenser la configuration des bat-

teries qui n'a guère évoluée depuis des décennies. Il serait temps de concevoir des batteries de type « LEGO » où chaque composant de la batterie pourra être recyclé indépendamment (Figure 7b). Il ne s'agit pas d'un rêve puisque dans le passé la recharge mécanique des piles Zn-air par remplacement de l'électrode de Zn fut mise en pratique. C'est en matière de nouveaux procédés et de nouvelles configurations que le recyclage pourrait trouver sa propre évolution et redevenir attractive vis-à-vis des futures générations tant la cause est noble.

### 1.5. Conclusions/perspectives

En raison de son impact sociétal et planétaire, la technologie à ions Li est vue à ce jour, et à juste titre, comme une grande découverte du XX<sup>ième</sup> siècle. Je répondrai par l'affirmative à la question posée au départ de cette tribune. Les batteries sont une bonne option pour un développement durable, mais à condition de remplir quelques critères. Ils incluent la nécessité (i) d'utiliser de l'énergie primaire provenant d'énergies renouvelables pour les recharger; (ii) d'élaborer des matériaux d'électrodes de plus haute capacité et à base de métaux abondants via des procédés moins énergivores; (iii) de développer des technologies de batteries plus éco-compatibles, (iv) d'injecter de l'intelligence dans les batteries via des capteurs et des fonctionnalités auto-réparatrices pour repousser l'âge pivot de recyclage et permettre de donner une seconde vie à la batterie et enfin (v) de lancer une politique de recyclage agressive incluant des procédés et circuits courts de récupération et la mise en place de normes strictes. Il s'agit là de défis scientifiques fondamentaux résultant de l'existence de verrous technologiques concrets qui nécessiteront, outre une approche multidisciplinaire, une synergie profonde entre recherche fondamentale et appliquée renforçant ainsi l'intérêt de ce domaine de recherche.

Bien qu'une recherche performante se fasse en Europe, c'est l'Asie qui domine à 95% le marché des batteries. C'est une situation inconfortable pour l'Europe de l'automobile, qui dans la course à la mobilité électrique sera dépendante de l'Asie pour son approvisionnement. Pour répondre à cela, une politique industrielle de fabrication de batteries se met en place en Europe via des projets de construction

d'usines géantes « gigafactories ». Bien que cela apporte une certaine souveraineté au niveau du stockage, il s'agit encore d'une position défensive qui lui confèrera toujours un rôle de spectateur. Pour obtenir *in fine* une part substantielle de ce marché lucratif de la mobilité électrique et des énergies renouvelables, l'Europe devra se montrer plus offensive. Il s'agira de mettre en place dans le temps des stratégies de recherche disruptives et innovantes, visant à apporter une valeur ajoutée aux batteries, grâce à de nouveaux paradigmes mobilisant des approches systémiques impliquant de nouveaux secteurs de recherche et d'acteurs industriels. Les investissements industriels actuels pour les *gigafactories* doivent aller de pair avec des investissements dans le secteur académique si nous ne voulons pas répéter l'histoire et voir s'affirmer à nouveau dans les années à venir la suprématie de l'Asie. Nous ne répéterons pas assez l'importance de la synergie entre les connaissances scientifiques et technologiques pour sécuriser une chaîne de valeur européenne totale.

Le lancement récent du *flagship* européen « Battery 2030+ », dont les trois piliers fondateurs sont (i) l'utilisation de l'intelligence artificielle pour la découverte accélérée de nouveaux matériaux et la maîtrise des interfaces, (ii) le développement de nouvelles stratégies de diagnostic/autoréparation pour la conception de batteries intelligentes et (iii) la mise au point de nouveaux concepts de recyclage et de configurations d'accumulateurs, est la preuve de la prise de conscience de l'Europe des efforts à fournir pour conquérir le leadership dans le domaine des batteries. Nous ne pouvons que nous en réjouir et œuvrer tous avec enthousiasme pour réussir ce pari dont l'enjeu pour la France et l'Europe est de retrouver une véritable indépendance énergétique.

### Remerciements

Je souhaite remercier Benjamin Campech pour ses conseils et les relectures apportées à cette tribune.

### Références

Assat, G. and Tarascon, J.-M. (2018). Fundamental understanding and practical challenges of anionic redox activity in Li-ion batteries. *Nat. Energy*, 3 :373–386.



- Bétermier, F. et al. (2020). Single-sulfur atom discrimination of polysulfides with a protein nanopore for improved batteries. *Commun. Mater.*, 1 :59.
- Chen, S. et al. (2016). Renovation of  $\text{LiCoCO}_2$  with outstanding cycling stability by thermal treatment with  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  from spent Li-Ion batteries. *J. Energy Storage*, 8 :262–273.
- Cometto, C. et al. (2019). Means of using cyclic voltammetry to rapidly design a stable DMC-based electrolyte for Na-ion batteries. *J. Electrochem. Soc.*, 166(15) :A3723–A3730.
- Famprikis, T. P. et al. (2019). Fundamentals of inorganic solid-state electrolytes for batteries. *Nat. Mater.*, 18 :1278–1291.
- Gaines, L. (2018). Lithium-ion battery recycling processes. Research towards a sustainable course. *Sustain. Mater. Technol.*, 17(C).
- Harlow, J. E. et al. (2019). A wide range of testing on an excellent Li-ion cell chemistry to be used as benchmark for new type battery technologies. *J. Electrochem. Soc.*, 166(13) :A3031–A3044.
- Harper, G. et al. (2019). Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. *Nature*, 575 :75–86. 7 November 2019.
- Huang, J. et al. (2020). Operando monitoring of chemical and thermal events in commercial Na(Li)-ion cells via optical sensors. *Nat. Energy*, 5(9) :674–683.
- Jones, S. D. and Akridge, J. R. (1992). A thin film solid-state battery. *Solid State Ion.*, 53-56 :628.
- Kanno, R. and Murayama, M. (2001). Lithium ionic conductor Thio-LISICON. The  $\text{Li}_2\text{S} - \text{GeS} - \text{P}_2\text{S}_5$  System. *J. Electrochem. Soc.*, 148 :A742.
- Larcher, D. and Tarascon, J.-M. (2015). Towards greener and more sustainable batteries for electrical energy storage. *Nat. Chem.*, 7 :19–29.
- Lu, Z. and Dahn, J. R. (2002). Understanding the anomalous capacity  $\text{Li/Li}[\text{Ni}_x\text{Li}_{1/3} - 2/3\text{xMn}_{2/3} - \text{x}/3]\text{O}_2$  cells using in situ X-ray diffraction and electrochemical studies. *J. Electrochem. Soc.*, 149 :A815–A822.
- Padhi, A. K. et al. (1997). Effect of structure on the  $\text{Fe}^3/\text{Fe}^{2+}$  redox couple in iron phosphates. *J. Electrochem. Soc.*, 144 :1609–1613.
- Ponrouch, A. et al. (2013). Towards high energy density sodium ion batteries through electrolyte optimization. *Energy Environ. Sci.*, 6 :2361–2369.
- Rozier, P. and Tarascon, J.-M. (2015). Li-rich layered oxide cathodes for next-generation Li-ion batteries : chances and challenge. *J. Electrochem. Soc.*, 162(14) :A2490–A2499.
- Sathiyar, M. et al. (2013). Reversible anionic redox chemistry in high-capacity layered-oxides electrodes. *Nat. Mater.*, 12 :827–835.
- Tarascon, J.-M. (2010). Is lithium the new gold? *Nat. Chem.*, 2 :510.
- Tarascon, J.-M. (2016). The Li-ion battery : 25 years of exciting and enriching experiences. *Electrochem. Soc. Interface*, 75 :79–83.
- Tarascon, J.-M. (2020). Na-ion versus li-ion batteries : Complementarity rather than competitiveness. *Joule*, 4(8) :1616–1620.
- Tetgar, F. (2011). Déchets et développement durable. la réincarnation des métaux. Conférence Collège de France, 22.02.2011.
- Thackeray, M. M. et al. (2007).  $\text{Li}_2\text{MnO}_3$ -stabilized  $\text{LiMO}_2$  (M =Mn, Ni, CO) electrodes for lithium-ion batteries. *J. Mat. Chem.*, 17 :3112–3125.
- Thangadurai, V., Narayanan, S., Pinzaru, D., et al. (2014). Garnet-type solid-state fast Li ion conductors for Li batteries : critical review. *Chem. Soc. Rev.*, 43 :4714–4727.
- Yabuuchi, N. et al. (2012). P2-type  $\text{Na}_x[\text{Fe}_{1/2}\text{Mn}_{1/2}]\text{O}_2$  made from earth abundant elements for rechargeable Na batteries. *Nat. Mater.*, 11 :512–517.

# Comptes Rendus

## Géoscience

### Objet de la revue

Les *Comptes Rendus Géoscience* sont une revue électronique évaluée par les pairs de niveau international, qui couvre l'ensemble des domaines des sciences de la Terre et du développement durable. Ils publient des articles originaux de recherche, des articles de revue, des mises en perspective historiques, des textes à visée pédagogique ou encore des actes de colloque, sans limite de longueur, en anglais ou en français. Les *Comptes Rendus Géoscience* sont diffusés selon une politique vertueuse de libre accès diamant, gratuit pour les auteurs (pas de frais de publication) comme pour les lecteurs (libre accès immédiat et pérenne).

**Directeur de la publication :** Étienne Ghys

**Rédacteurs en chef :** Éric Calais, Michel Campillo, François Chabaux, Ghislain de Marsily

**Comité éditorial :** Jean-Claude André, Pierre Auger, Mustapha Besbes, Sylvie Bourquin, Yves Bréchet, Marie-Lise Chanin, Philippe Davy, Henri Décamps, Sylvie Derenne, Michel Faure, François Forget, Claude Jaupart, Jean Jouzel, Eric Karsenti, Amaëlle Landais, Sandra Lavorel, Yvon Le Maho, Mickaele Le Ravalec, Hervé Le Treut, Benoit Noetinger, Carole Petit, Valérie Plagnes, Pierre Ribstein, Didier Roux, Bruno Scaillet, Marie-Hélène Tusseau-Vuillemin, Élisabeth Vergès

**Secrétaire éditoriale :** Adenise Lopes

### À propos de la revue

Toutes les informations concernant la revue, y compris le texte des articles publiés qui est en accès libre intégral, figurent sur le site <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/geoscience/>.

### Informations à l'attention des auteurs

Pour toute question relative à la soumission des articles, les auteurs peuvent consulter le site <https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/geoscience/>.

### Contact

Académie des sciences

23, quai de Conti, 75006 Paris, France

Tél. : (+33) (0)1 44 41 43 72

CR-Geoscience@academie-sciences.fr



# COMPTES RENDUS DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES

## *Géoscience* *Sciences de la Planète*

Volume 352, n° 4-5, décembre 2020

### **Special issue / Numéro thématique**

Facing climate change, the range of possibilities / *Face au changement climatique, le champ des possibles*

### **Cover illustration / Illustration de couverture**

© 123rf.com

<b>Etienne Ghys, Ghislain de Marsily</b> La Science n'est pas Floue ...	247-249
<b>Valérie Masson-Delmotte</b> Réchauffement climatique : état des connaissances scientifiques, enjeux, risques et options d'action	251-277
<b>Mireille Delmas-Marty</b> Le changement climatique, une chance pour l'humanité ?	279-283
<b>Pierre Léna, David Wilgenbus</b> Changement climatique et éducation	285-296
<b>Venkatramani Balaji</b> « Science des données » versus science physique: la technologie des données nous conduit-elle vers une nouvelle synthèse?	297-307
<b>Céline Guivarch</b> Quelles transformations pour l'atténuation du changement climatique ? Des trajectoires d'émissions mondiales à la trajectoire française	309-317
<b>Henri Waisman</b> Quelles transitions pour l'atténuation du changement climatique ? Transformations globales, enjeux sociétaux, et leçons pour la décision	319-328
<b>Hervé Le Treut</b> Anticiper l'évolution des territoires	329-337
<b>Isabelle Chuine</b> Changement climatique et biosphère	339-354
<b>Didier Roux</b> Énergie et climat : défis et innovations	355-360
<b>Vincent Vigié</b> Les villes et le climat : Bâtiments et urbanisme	363-372
<b>Yves Bréchet</b> Le rôle de l'énergie nucléaire dans la lutte contre le réchauffement climatique : atouts et faiblesses dans une approche intégrée	373-381
<b>Isabelle Czernichowski-Lauriol</b> Captage et Stockage du CO <sub>2</sub> : le puits de carbone géologique	383-398
<b>Jean-Marie Tarascon</b> Les batteries sont-elles la bonne option pour un développement durable ?	401-414

# CAMPIERS PENNDS GOSCIOLMO DE LAACADEMIE DES SCIENCES

352, rue de la Harpe  
75005 Paris, France  
Tél : 01 47 77 40 00  
Fax : 01 47 77 40 01  
E-mail : [campiers@campiers.com](mailto:campiers@campiers.com)  
[www.campiers.com](http://www.campiers.com)