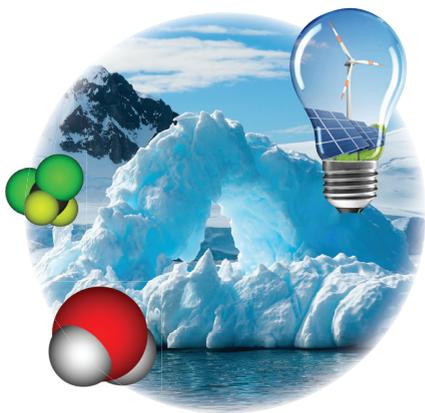
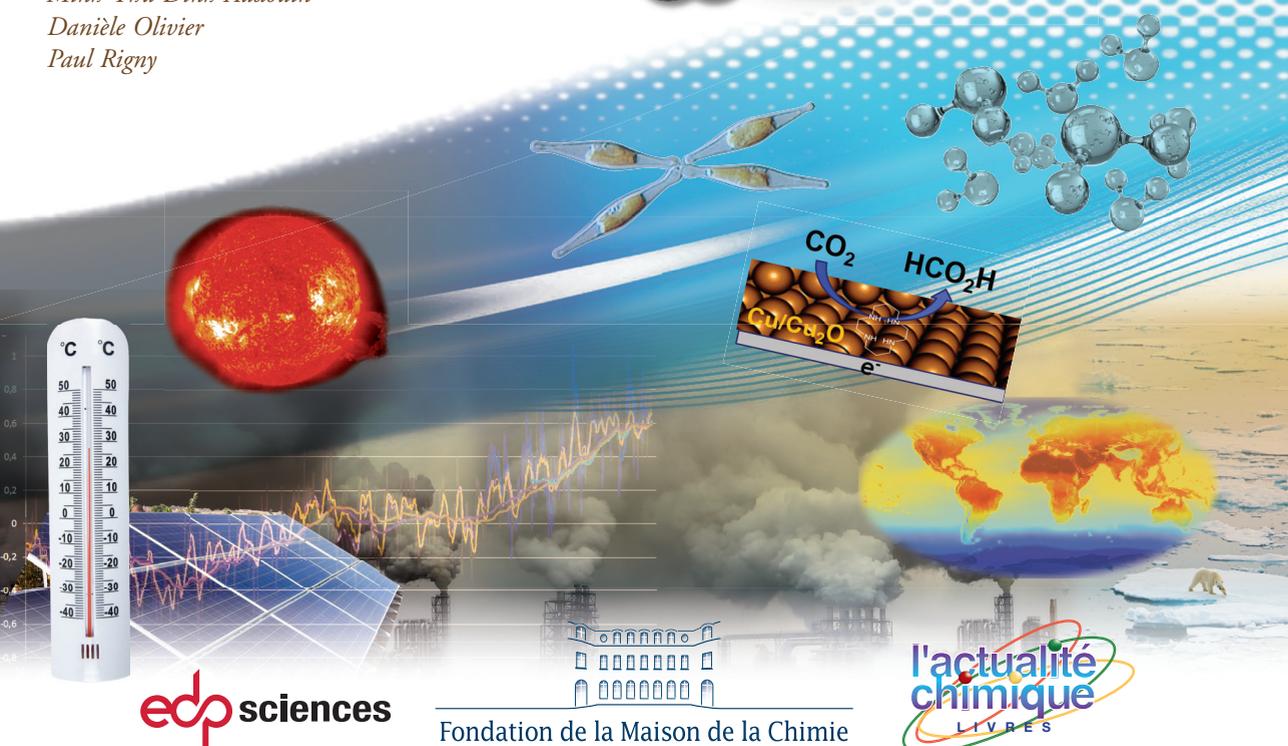
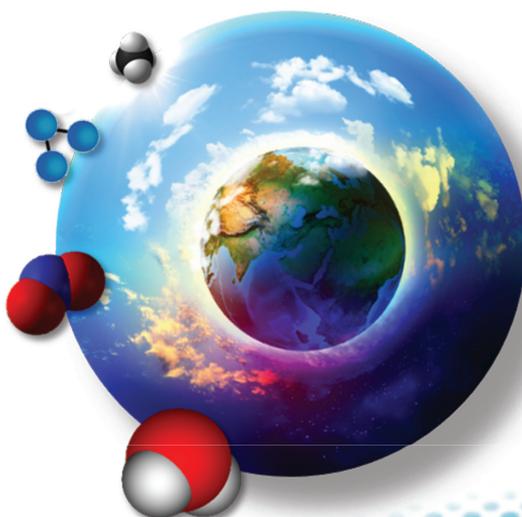


Chimie et changement climatique



Jean-Claude Bernier
Guy Brasseur
Yves Bréchet
Sébastien Candel
Anny Cazenave
Vincent Courtillot
Marc Fontecave
Emmanuel Garnier
Philippe Gœbel
Jack Legrand
Michel Legrand
Hervé Le Treut
Pascal Mauberger

Coordonné par
Minh-Thu Dinh-Audouin
Danièle Olivier
Paul Rigny



edp sciences

Fondation de la Maison de la Chimie

**l'actualité
chimique**
LIVRES

Chimie et changement climatique





Cet ouvrage est issu du colloque « Chimie et changement climatique »,
qui s'est déroulé le 18 novembre 2015 à la Maison de la Chimie.

« COLLECTION CHIMIE ET ... »

Collection dirigée par Bernard Bigot

Président de la Fondation internationale de La Maison de la Chimie

Chimie et changement climatique

Jean-Claude Bernier, Guy Brasseur, Yves Bréchet, Sébastien Candel,
Anny Cazenave, Vincent Courtillot, Marc Pontecave, Emmanuel Garnier,
Philippe Gœbel, Jack Legrand, Michel Legrand, Hervé Le Treut, Pascal
Mauberger

Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin,
Danièle Olivier et Paul Rigny



Conception de la maquette intérieure et de la couverture :
Pascal Ferrari et Minh-Thu Dinh-Audouin

Images de la couverture : glace, ampoule, globe : doethion,
Coloures-pic, Sergey Nivens – Fotolia.com ; microalgue : Wikipédia,
Creative Commons CC-BY-2.5, Image courtesy of Alessandra de Martino
and Chris Bowler ; 4^e de couverture : ampoule et ville : Coloures-pic –
Fotolia.com ; SG COP21 ; globe : Simon Chabrilat, BISA ; éoliennes :
David McKay (2012).

Iconographie : Minh-Thu Dinh-Audouin
Mise en pages et couverture : Patrick Leleux PAO (Caen)

Imprimé en France

ISBN : 978-2-7598-2035-1

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1^{er} de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du code pénal.

© EDP Sciences 2016

EDP Sciences
17, avenue du Hoggar, P.A. de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Ont contribué à la rédaction de cet ouvrage :

Jean-Claude Bernier

Professeur Émérite de
l'Université de Strasbourg
Ancien directeur du
département Chimie du CNRS

Guy Brasseur

Ancien Directeur
Institut Max Planck de
Météorologie (Hambourg,
Allemagne)
National Center for
Atmospheric Research
(Boulder, CO, États-Unis)

Yves Bréchet

Professeur
Institut Polytechnique de
Grenoble
Haut-Commissaire à l'Énergie
Atomique
Membre de l'Académie
des Sciences

Sébastien Candell

Professeur des Universités
Émérite à CentraleSupélec
Laboratoire EM2C, CNRS
Université Paris-Saclay
Vice-président de l'Académie
des sciences

Anny Cazenave

Directeur pour les sciences de
la Terre à l'International Space
Science Institute à Berne
Chercheur Émérite au
Laboratoire d'Études en
Géophysique et Océanographie
Spatiale
Membre de l'Académie
des sciences

Vincent Courtillot

Professeur Émérite
de Géophysique
Université Paris-Diderot
Ancien Directeur de l'Institut
de Physique du Globe
Membre de l'Académie
des Sciences

Marc Fontecave

Professeur au Collège de
France
« Chaire de Chimie des
Processus Biologiques »
Président de la Fondation du
Collège de France
Membre de l'Académie des
Sciences

Emmanuel Garnier

Membre senior Institut
Universitaire de France
Directeur de Recherche CNRS
Historien du climat et des
risques
UMR LIENSs-Université de La
Rochelle

Philippe Gœbel

Président de l'Union des
Industries Chimiques (UIC)

Jack Legrand

Professeur à l'Université de
Nantes
Directeur du GEPEA,
Laboratoire de Génie des
Procédés, Environnement,
Agroalimentaire - UMR CNRS
6144/Université de Nantes/
École des Mines de Nantes/
ONIRIS

Michel Legrand

Directeur de recherche au
CNRS
Chimiste de l'atmosphère et
des archives glaciaires
Laboratoire de Glaciologie
et Géophysique de
l'Environnement
UMR 5183, Grenoble

Hervé Le Treut

Professeur à l'Université Pierre
et Marie Curie et à l'École
Polytechnique
Directeur de l'Institut-Pierre-
Simon-Laplace
Membre de l'Académie des
Sciences

Pascal Mauberger

Président Directeur Général de
McPhy Energy
Président de l'Association
Française pour l'Hydrogène
et les Piles à Combustible
(AFHYPAC)

Équipe éditoriale :

**Minh-Thu Dinh-Audouin,
Danièle Olivier
et Paul Rigny**

Sommaire

Avant-propos : par **Danièle Olivier** et **Paul Rigny** 9

Préface : par **Bernard Bigot**..... 13

Partie 1 Les variations multi-décennales et séculaires du climat

Chapitre 1 : Le changement climatique : perspectives et implications pour le **xxi^e** siècle
par **Hervé Le Treut** 19

Chapitre 2 : La compréhension du changement climatique, de ses sources à sa modélisation : questions encore ouvertes ?
d'après la conférence de **Vincent Courtillot** .. 45

Chapitre 3 : Fluctuations climatiques extrêmes et sociétés au cours du dernier millénaire
par **Emmanuel Garnier** 67

Partie 2 La chimie : un outil pour l'étude du changement climatique

Chapitre 4 : La chimie de la glace : une archive de notre environnement passé
par **Michel Legrand** 87

Chapitre 5 : La hausse du niveau de la mer : observations et projections
par **Anny Cazenave** 105

Chapitre 6 : Chimie atmosphérique et climat
par **Guy Brasseur**..... 113

Partie 3

La transformation du système énergétique pour assainir notre atmosphère et gérer le risque climatique

- Chapitre 7** : Que faire du CO₂ ? De la chimie !
par **Marc Fontecave** 133
- Chapitre 8** : Actions des entreprises de la chimie au service de la lutte contre le changement climatique
par **Philippe Gœbel** 153
- Chapitre 9** : Prix du baril et énergies renouvelables
par **Jean-Claude Bernier** 165
- Chapitre 10** : La complexité du réseau et l'électricité verte
d'après la conférence de **Yves Bréchet** 177

Partie 4

La chimie pour se passer des combustibles fossiles

- Chapitre 11** : La chimie face aux défis de la transformation du système énergétique
par **Sébastien Candel** 197
- Chapitre 12** : Les microalgues : pour quoi faire ?
par **Jack Legrand** 223
- Chapitre 13** : L'hydrogène, vecteur de la transition énergétique
par **Pascal Mauberger** 239

Avant- propos

La mission de la Fondation de la Maison de la Chimie est de promouvoir la chimie et ses applications pour contribuer à son développement au service de l'homme et de la société. Il s'agit en particulier de faire prendre conscience à un public non spécialiste (sans oublier les plus jeunes) de tout ce que notre vie quotidienne doit à la chimie : qualité de vie, santé, bien-être. Il s'agit aussi de montrer que dans leur structure même, nos sociétés dépendent profondément du savoir-faire des industries de la chimie, cette science et cette technique qui sont à la base de l'économie des ressources, des approvisionnements en énergie tellement indispensables, de l'utilisation intelligente des richesses de la nature...

Dans ce cadre, la Fondation a développé depuis 2007 une série de colloques « Chimie et... » ouverts à un public varié, qui va des lycéens et de leurs enseignants aux collègues scientifiques de la recherche et de l'industrie, en passant par le public le plus large. Les ouvrages de la collection « Chimie et... » sont issus de ces colloques et ont le même objectif de répondre aux attentes des

citoyens curieux et impliqués dans le développement de la chimie – à la fois science et technique – pour le présent et pour l'avenir.

À vrai dire, le thème du présent volume *Chimie et changement climatique* ne concerne la « vie quotidienne » qu'avec une acception un peu différente des autres. Plus que directement invention de l'homme comme l'est une technologie, le changement climatique est une conséquence indirecte, évidemment non voulue et même ignorée jusqu'aux années 1960 de la révolution industrielle, qui remonte pourtant au début du 19^e siècle. L'observation des paramètres de l'environnement de la planète – à commencer par la température moyenne de l'atmosphère, et à suivre par la modification des océans et de la vie marine – a fait prendre conscience de l'importance des changements et de leur inquiétante rapidité. Les scientifiques ont approfondi ces observations, cherché à les comprendre, et ont alerté les autorités politiques tout autour de la planète sur la nécessité de ne pas laisser les choses en l'état.

Sous l'égide des Nations Unies, un groupe de scientifiques d'une grande diversité

de disciplines s'est constitué : le GIEC (Groupe d'experts intergouvernementaux sur l'évolution du climat). Depuis 1990 et environ tous les six ans, il rend un rapport qui fait le point des avancées scientifiques obtenues dans la compréhension des phénomènes qui sont à la base du changement climatique et dans l'évaluation de sa progression. Le dernier rapport du GIEC (le cinquième) date de 2014 et a été largement discuté et commenté à la grande conférence sur le climat, dite COP21, qui s'est tenue à Paris en décembre 2015. Au milieu de toutes les compétences scientifiques mises en œuvre pour les travaux du GIEC, la chimie apparaît comme particulièrement féconde.

On rencontre la chimie pour expliquer d'importants phénomènes de base, comme la formation des aérosols dans l'atmosphère, qui jouent un rôle clé pour déterminer le couplage entre le rayonnement du Soleil et notre atmosphère, et donc le « réchauffement climatique ». On la rencontre pour inventer des moyens dont il faut bien se doter pour lutter contre ce changement et en limiter au mieux les effets destructeurs. Le grand coupable en la matière est l'usage des combustibles fossiles sur lesquels reposent toute l'industrie et une grande partie de l'activité des citoyens – en particulier dans le domaine des transports – car leur combustion produit ces fameux « gaz à effet de serre » responsables du réchauffement. Pourtant, les besoins en énergie vont continuer à croître, puisque la

population de la planète continue à s'accroître. La chimie étudie de nombreuses solutions qui gagnent d'année en année en réalisme et en faisabilité pour éviter le recours aux combustibles fossiles. Le principal des gaz à effet de serre est le gaz carbonique (CO_2), qui s'accumule dans l'atmosphère. Mais CO_2 est une molécule potentiellement intéressante : grâce à des procédés chimiques appropriés, il peut être à la base de la production industrielle de nombreuses substances fabriquées aujourd'hui par des procédés polluants. C'est en quelque sorte une matière première « gratuite » puisque présente en excès dans l'atmosphère d'aujourd'hui, et l'économie peut en tirer parti.

Les usages de la chimie au service de la lutte contre le changement climatique montrent à quel point elle se révèle comme précieuse pour l'humanité. Au siècle où les bases techniques de la société menacent de s'effondrer puisque l'usage des combustibles fossiles rencontre tant de difficultés, la chimie offre les moyens de résister et de nous construire à nouveau. Ses solutions doivent être disponibles aussi rapidement que possible pour être efficaces contre le réchauffement : il faut atteindre le stade de leur mise en œuvre. Si la recherche sur ces questions est déjà riche et prometteuse – dans le monde et en France –, elle n'est encore que trop rarement exploitée à l'échelle industrielle. Les recherches doivent se prolonger par des études de développement et porter précisément leur

attention sur les coûts et la qualité des nouveaux procédés qui doivent évidemment respecter l'environnement mieux que leurs prédécesseurs.

Les livres de la collection « Chimie et... » sont destinés en particulier aux enseignants et aux familles des élèves qui devront choisir une voie professionnelle. Le présent volume *Chimie et changement climatique* les invite à un véritable effort collectif pour l'avenir des sociétés. Que le changement climatique, maintenant bien avéré et inévitablement en progression, ne soit plus une calamité, mais que grâce à la chimie il nous conduise à remplacer nos technologies par d'autres, respectueuses de l'environnement au sens général : celui qui est concerné non seulement par la gestion des déchets mais bien évidemment aussi par la lutte contre le réchauffement de la planète.

La richesse d'informations du type de celles fournies par les livres de la collection est aussi maintenant accessible sur le site Internet www.mediachimie.org créé par la Fondation en 2012. Comme les livres de notre collection, il est destiné tant aux enseignants qu'aux élèves et étudiants, mais aussi à tous les curieux du grand public. Les ressources provenant de nos ouvrages « Chimie et... » y sont complétées par des documents de nombreuses origines (Collège de France, CNRS, centres de recherche, etc.).

Danièle Olivier,

*Vice-présidente
de la Fondation de la Maison
de la Chimie*

Paul Rigny,

*Conseiller scientifique
après du président
de la Maison de la Chimie*

Préface

Les thèmes des ouvrages de la collection « Chimie et... » ont tous une grande importance sociale, économique ou culturelle, et correspondent à la volonté de mettre la science au service des hommes et de l'amélioration de leur qualité de vie.

Les auteurs font partie des meilleurs spécialistes des organismes de recherche publique et de l'industrie dans les domaines concernés. Ils font le point sur les apports présents, ou pressentis comme à venir, de la chimie sur les plans scientifique, industriel, domestique ou personnel. Ils cherchent aussi à répondre, sans tabous, et avec toute la rigueur nécessaire aux interrogations, et éventuellement aux inquiétudes légitimes, du public en se pliant au difficile exercice d'être accessible à tous.

Après les engagements pris lors de la 21^e Conférence des Parties (COP21) à la convention cadre des Nations Unies sur les enjeux des changements climatiques, l'enjeu est maintenant d'agir de manière concertée à l'échelle mondiale pour réduire les risques d'exposition aux dommages résultants du changement climatique que l'on observe, quelle qu'en soit l'origine.

Cet enjeu concerne l'ensemble des habitants de notre

planète et nécessite une vision à long terme. Chacun doit apporter sa pierre à l'édifice, c'est pourquoi la Fondation de la Maison de la Chimie a réuni les meilleurs experts du climat, des océans, de l'atmosphère,...., pour montrer ce qui est ou pourrait être l'apport des chimistes (qu'ils soient chercheurs ou responsables industriels) dans la compréhension des facteurs du changement climatique et dans la recherche de solutions.

Des scientifiques reconnus au niveau international et ayant des positions à défendre sur le sujet du climat ont été sollicités, afin d'éclairer sans parti pris l'opinion publique, et notamment les jeunes et leurs formateurs, sur l'identification des facteurs du changement climatique, et sur la recherche de solutions pour limiter le réchauffement associé, ainsi que pour lutter contre ses conséquences.

Hormis l'énergie nucléaire, la principale source d'énergie disponible sur la Terre provient du Soleil. La Terre est actuellement dans un état de déséquilibre énergétique : elle absorbe plus d'énergie en provenance du Soleil qu'elle n'en réémet, d'où le réchauffement climatique.

La première partie de cet ouvrage présente deux visions

actuelles des causes de ce déséquilibre :

- une vision, minoritaire, dans laquelle les variations de l'activité solaire et celles de l'orbite de la Terre sont les principaux déterminants de la variation du climat actuellement observée ;
- la vision, actuellement majoritaire, des scientifiques qui étudient le climat où ce n'est plus le Soleil, mais les gaz à effet de serre (notamment le gaz carbonique) relargués dans l'atmosphère par la combustion des hydrocarbures fossiles qui dominent largement les effets des variations de l'activité du Soleil et sont la cause principale des variations du climat.

L'historien du climat Emmanuel Garnier y montre aussi qu'au-delà des phases majeures de l'histoire du climat, souvent statistiques et modélisatrices, il convient de pas perdre de vue la dimension sociale des variations observées et de faire une place particulière aux extrêmes climatiques qui focalisent l'attention des opinions politiques et des décideurs. Elles prouvent l'existence possible de stratégies d'adaptation et de formes de gouvernances qui sont des retours d'expérience précieux pour agir dans l'avenir.

La seconde partie montre comment la chimie aide à mieux identifier la réalité de l'influence de l'homme sur le système terrestre en vue d'atténuer l'ampleur du changement climatique. Les espèces chimiques de l'atmosphère interagissent avec les rayonnements émis par le Soleil et le rayonnement infrarouge émis

par la Terre. La température de la Terre est influencée par ces interactions.

La chimie de la glace constitue une véritable archive de notre environnement et les données qui en sont extraites et qui correspondent à notre entrée dans la période récente sont précieuses pour comprendre le changement climatique actuel et prédire son évolution future.

Le surplus d'énergie reçu par la Terre s'accumule dans les océans sous forme de chaleur. Les conséquences actuelles et celles prévisibles selon les modèles d'évolution du climat sont expliquées.

Il est important de prendre conscience que quelles que soient les causes du changement climatique, lutter contre le réchauffement climatique requiert de mobiliser des leviers beaucoup plus divers que la seule réduction des gaz à effet de serre. Cela nécessite la mise en place d'une politique mondiale coordonnée de l'énergie et des ressources énergétiques dans laquelle la chimie et son industrie jouent et devront jouer un rôle moteur vers une société décarbonée.

Dans les deux dernières parties, quelques-uns des meilleurs spécialistes de ces sujets dressent le bilan scientifique et économique des solutions actuellement proposées, et présentent les verrous scientifiques et techniques qui demeurent à lever.

La partie 3 montre l'importance de la transformation du système énergétique pour assainir notre atmosphère et mieux gérer le risque climatique. Une nouvelle chimie et

de nouvelles technologies sont en développement pour capturer, séquestrer et recycler le gaz carbonique d'origine industrielle. Même si la chimie basée sur les ressources fossiles restera importante encore de nombreuses années, la chimie du végétal est en plein développement et trouve sa place dans le futur de l'industrie, contribuant ainsi à une indépendance énergétique croissante. Par ailleurs, l'industrie chimique en France a réduit de 60 % ses émissions de gaz à effet de serre ; elle développe des efforts importants d'innovation dans le sens de procédés industriels plus sobres en carbone et aussi sur le recyclage des matières utilisées. C'est aussi grâce aux produits et aux solutions innovantes que la chimie met à leur disposition que les industries en aval de l'industrie chimique ainsi que les particuliers peuvent réduire leur empreinte énergétique.

Mais malgré la prise de conscience du changement climatique et de l'inexorable fin des ressources carbonées, le développement des énergies renouvelables demeure très dépendant des conditions politico-économiques, et notamment du prix du baril de pétrole. De plus, ces énergies renouvelables sont par nature intermittentes et imposent des contraintes physiques sur le réseau de distribution électrique, qui conduisent à examiner avec un regard nouveau les possibilités de stockage de masse, d'extension du réseau, de stratégie d'autoconsommation.

Il y aura donc de réelles difficultés à réaliser la trans-

formation du système énergétique, et il faudra pour cela mobiliser toute l'imagination et la créativité des chercheurs et des ingénieurs pour trouver des solutions adaptées, réaliser des innovations, concevoir des ruptures.

La dernière partie montre la place de la chimie face à ces défis et l'illustre sur deux exemples. L'hydrogène est un vecteur énergétique puissant qui peut rendre de grands services dans la transition énergétique. L'exploitation et la valorisation industrielle des microalgues, qui restent actuellement très modestes par rapport au potentiel identifié de cette nouvelle biores- source, car de nombreux verrous technico-scientifiques restent à lever. Les difficultés scientifiques et techniques sont clairement sous estimées par les innombrables commentateurs, par les décideurs, et par le public.

Nous avons voulu que, à travers cet ouvrage, chacun puisse s'informer scientifiquement, rigoureusement et objectivement, afin de pouvoir prendre, à son niveau, sa part de responsabilité dans des décisions qui engagent l'avenir de notre planète, notre mode de vie et nos sociétés.

Je vous souhaite une heureuse lecture de cet ouvrage au moment de remercier chaleureusement tous ceux qui y ont contribué.

Bernard Bigot

*Président de la Fondation
internationale de la Maison de
la Chimie*

*Directeur général d'ITER
Organization*

Partie 1

Les variations
multi-décennales
et séculaires du climat

Le changement climatique :

perspectives et implications pour le XXI^e siècle

Hervé Le Treut est physicien, directeur de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL)¹, qui regroupe neuf laboratoires dont les thématiques de recherche concernent l'environnement global, professeur à l'Université Pierre et Marie Curie et à l'École Polytechnique, et membre de l'Académie des Sciences.

1 Le climat dans lequel se sont développées nos civilisations : une situation très particulière

La question du changement climatique est partie d'une constatation des années 1960-1970 : celui d'un risque de changement majeur dans la composition chimique de l'atmosphère. Anticipée par les travaux de Revelle et Suez (1957), l'augmentation du dioxyde de carbone (CO₂) atmosphérique a été mise en évidence par les mesures régulières menées dès 1958 à l'observatoire du Mauna Loa, dans l'île d'Hawaï. Elle répond à des émissions de gaz à effet de serre qui se sont développées surtout après la Seconde Guerre mondiale.

Cette évolution marque une rupture très forte par rapport aux 10 000 dernières années.

En effet, si des changements importants de la composition chimique de l'atmosphère sont survenus de manière répétée au cours de l'ère quaternaire, les 10 000 dernières années, celles du développement de nos civilisations, ont été globalement très stables en termes de teneur atmosphérique en gaz à effet de serre de longue durée de vie (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote). Elles ont été stables aussi en termes de variations thermiques globales, puisque les estimations des variations de température moyenne indiquent des changements de l'ordre de grandeur des dixièmes de degrés – ce qui est attendu quand on sait que tous les changements importants de température dans le passé ont induit des changements notables de la composition chimique de l'atmosphère.

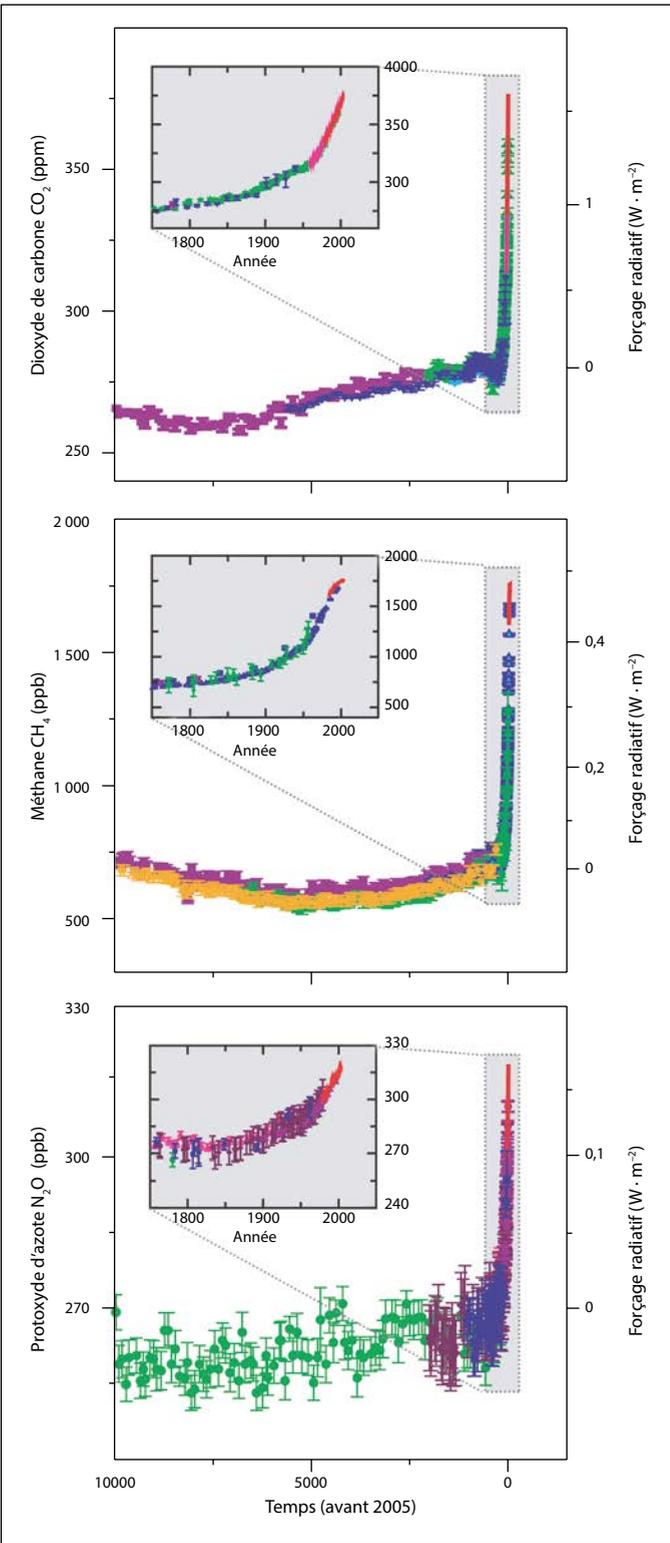
La **Figure 1** montre que la stabilité de la concentration

1. www.ipsl.fr

Figure 1

Variation des concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère depuis 12 000 années : 10 000 ans de « quasi-stabilité » et quelques décennies de changement.
 ppm = partie par million ; ppb = partie par milliard.

Source : IPCC (GIEC) 2007.



atmosphérique en gaz carbonique CO₂, en méthane CH₄ et en protoxyde d'azote N₂O a été remarquable au cours des 10 000 années qui ont précédé l'époque contemporaine. C'est à partir du début de l'ère industrielle que l'on note une évolution, qui devient brutale à partir des années 1950. L'augmentation du CO₂ atmosphérique qui se produit à ce moment s'explique en grande partie (de l'ordre de 80 %) par l'usage des combustibles fossiles : le charbon, le pétrole, le gaz naturel – le reste étant essentiellement dû à la déforestation et aux cimenteries.

La **Figure 2** donne, en gigatonnes (milliards de tonnes), la quantité de CO₂ émise mondialement dans l'atmosphère. On émettait dans les années 1950 de 1 à 2 milliards de tonnes de carbone par an ; on a dépassé le seuil de 3 ou 4 milliards de tonnes dans les années 1970, et au moment du Sommet de la Terre de Rio² en 1992, on émettait 6 ou 7 milliards de tonnes par an. Aujourd'hui, malgré le protocole de Kyoto et les tentatives de lui donner une suite, en particulier à Paris lors de la COP21 en décembre 2015, on est à plus de 10 milliards de tonnes émises annuellement, liées dans une large mesure au développement très fort de l'Est Asiatique.

Deux facteurs sont à prendre en compte pour comprendre les évolutions :

2. Les Sommets de la Terre sont des rencontres décennales entre dirigeants mondiaux organisées depuis 1972 par l'ONU, avec pour but de définir les moyens de stimuler le développement durable au niveau mondial.

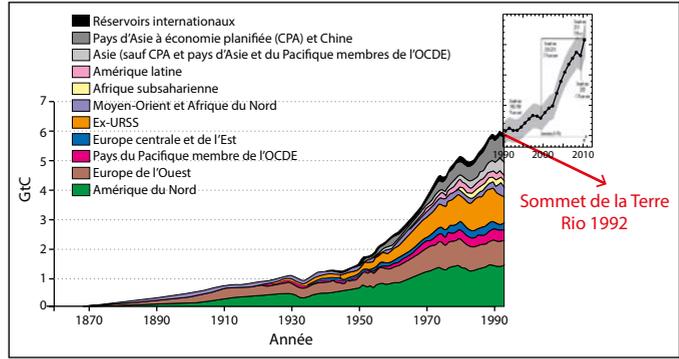


Figure 2

Émissions de CO₂ (en milliards de tonnes de carbone (GtC) par an) liées à l'usage des combustibles fossiles.

Source : International Energy Agency.

– **l'effet de cumul** : les surplus de CO₂ émis dans l'atmosphère qui ne sont pas immédiatement repris par l'océan ou la végétation continentale continuent de s'éliminer, au moins en partie, mais cette disparition est lente. On peut compter qu'au bout d'un siècle, seule une moitié de ce surplus a été résorbée. Ce phénomène explique une accumulation des quantités de CO₂ ;

– **l'effet de l'inertie des océans** : les gaz à effet de serre diminuent l'évacuation de la chaleur provenant du Soleil et entraînent une augmentation des températures à la surface de la planète qui se poursuit tant que l'augmentation associée du flux terrestre infrarouge vers l'espace n'a pas ramené le système terrestre à l'équilibre. Les couches superficielles des océans en interaction avec l'atmosphère comptent quelques dizaines de mètres d'épaisseur, selon la géographie et les saisons. Elles sont le principal lieu de stockage

de cette chaleur et sont à l'origine d'une importante inertie thermique des océans : il faut en conséquences une à quelques décennies pour que le chauffage des océans ne ramène le système Terre à l'équilibre. Il existe donc, une fois les gaz à effet de serre émis, un chauffage inévitable, mais retardé, des océans, qui se produit pendant toute cette phase, et correspond à une forme de « dette climatique ».

Pendant plusieurs décennies, une part des études du climat et du changement climatique a été motivée par la recherche d'une réponse à une question posée dès les années 60 ou 70 : « *Est-ce que les émissions de gaz à effet de serre constituent un danger ?* », que l'on peut prolonger par : « *Est-ce que le risque associé à l'émission massive de gaz à effet de serre dans l'atmosphère justifie une action de prévention ?* ».

2 Présentation de modèles de simulation de l'évolution climatique

Entre les années 1970 et les années 1990, il n'était pas possible d'observer de manière certaine les symptômes de l'action des gaz à effet de serre sur le climat, compte tenu du délai mentionné plus haut entre émission de gaz à effet de serre et réchauffement de la planète, et également parce que les changements induits restaient nécessairement faibles par rapport à la variabilité naturelle du climat. La seule approche possible a été la modélisation climatique. Celle-ci s'appuie sur une compréhens-

sion forte, basée sur des théories autant que des observations, de ce qu'est le système climatique ; elle exige un travail d'équipe considérable. Un modèle comme celui de l'IPSL (**Figure 3**) est fait de sous-modèles, consacrés respectivement à l'atmosphère, aux océans, aux composantes chimiques, biochimiques, aux échanges entre tous ces sous-systèmes. Il a au total mobilisé le travail de plus d'une centaine de personnes pendant plusieurs décennies, pour porter le modèle à maturité. Le développement d'un tel modèle se justifie aussi par toute une série d'autres applications (par exemple prévision à court et moyen termes de l'atmosphère et de la qualité de l'air, de paramètres océaniques tels que courants, salinités et niveau de la mer, ou encore de fluctuations complexes comme les événements El Niño, réponse à des épisodes volcaniques) : toutes participent à la validation de l'ensemble.

Bien sûr, l'IPSL n'est pas le seul au monde à travailler sur les modèles. Il existe mondialement une vingtaine de laboratoires et au moins une quarantaine de modèles. La **Figure 4** illustre un certain nombre des objectifs de la modélisation. Un modèle donné doit être capable, à formulation inchangée, de rendre compte de processus variés, dont certains sont vérifiables, sous une forme événementielle ou statistique, et d'autres correspondent à des projections futures qui ne seront vérifiables que dans quelques décennies. Les exercices de simulation coordon-

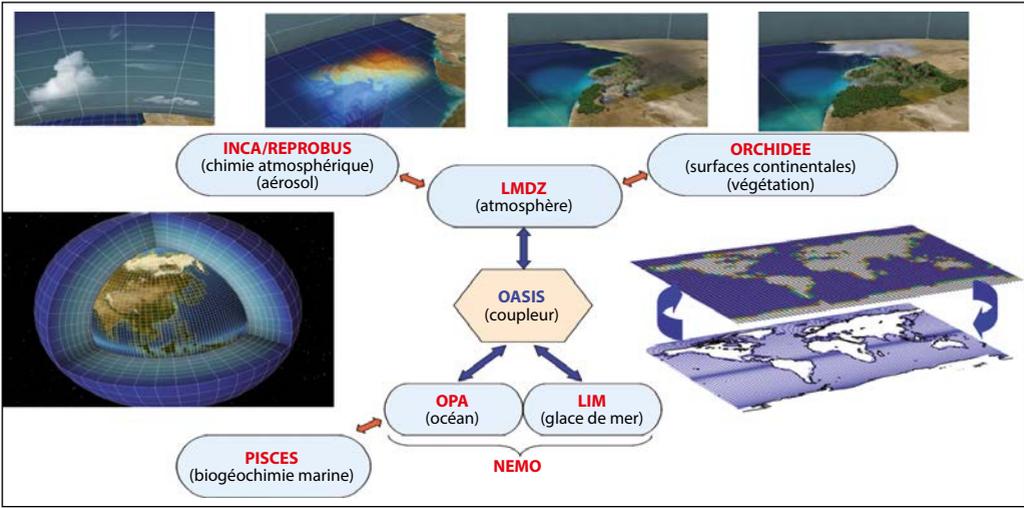


Figure 3

Les modélisations climatiques représentent un travail complexe. Dans le modèle couplé « Système Terre » de l'IPSL, végétation et atmosphère sont des notions essentielles à considérer ; les océans et les échanges entre tous ses paramètres doivent également être pris en compte.

Source : J.-L. Dufresne LMD/IPSL.

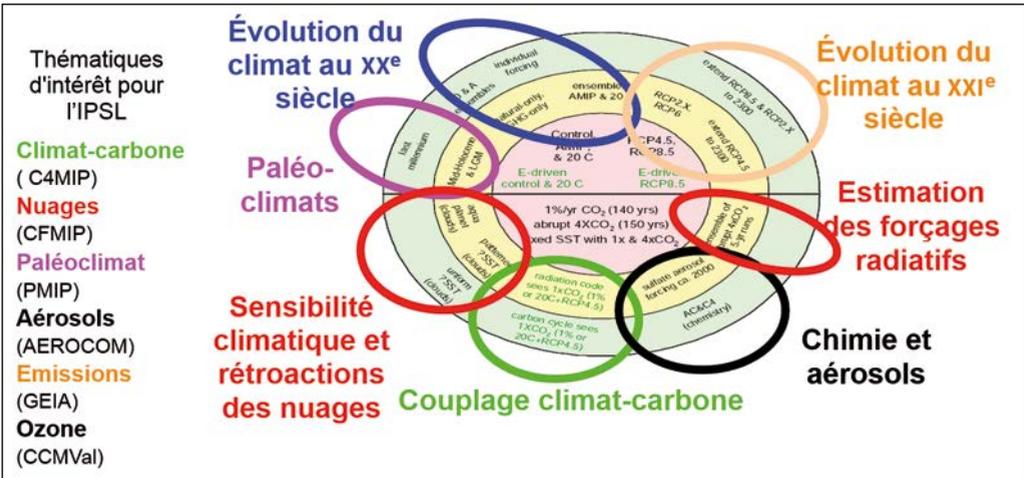


Figure 4

Simulations proposées pour l'expérience internationale CMIP-5. Recherche d'une meilleure appréhension du changement climatique via les 40 modèles de 20 laboratoires internationaux.

Source : J.-L. Dufresne LMD/IPSL.

nés au niveau international correspondent à une forme de mise en compétition des modèles et des instituts. La ligne de mire imaginaire qui

oriente un tel travail serait d'établir un modèle global qui saurait tout faire avec une fiabilité maximale. Il s'agit d'un objectif qui ne sera bien

sûr jamais atteint : la modélisation ne permettra jamais de créer un « clone » numérique de la planète réelle et reste un outil de réflexion, qui vaut par sa capacité à articuler sur un sujet donné des

théories, des observations, et une compréhension générale de la planète, dans le respect d'un grand nombre de lois physiques (voir l'*Encart : « L'élaboration et la vie d'un modèle ! »*).

L'ÉLABORATION ET LA VIE D'UN MODÈLE !

Comment développe-t-on un modèle ?

On le fait d'abord toujours dans un objectif et dans un contexte scientifique précis. Pour un problème donné il existe ainsi ce que l'on appelle une hiérarchie de modèles. Elle comporte des modèles abordant des processus très complexes de manière très ciblée (formation d'un type de nuage spécifique, échange d'eau et de carbone entre le sol, la végétation et l'atmosphère, physique détaillée des échanges radiatifs, processus chimiques et biochimiques détaillés dans l'atmosphère et l'océan) à des modèles « intégrés » associant au contraire en les simplifiant une large série de processus (physiques, chimiques, mais aussi écologiques, sociologiques, économiques) en passant par différents intermédiaires. C'est l'ensemble de ces modèles qui permet d'étudier un problème donné mais nous allons focaliser la suite sur ce que l'on appelle plus fréquemment les modèles climatiques ou modèles du système Terre. Ce sont les modèles les plus complexes, qui représentent l'ensemble des processus, sur un maillage global qui permet de résoudre de manière explicite les processus d'échelle supérieure à quelques centaines de kilomètres, et de manière statistique les processus plus locaux.

Les modèles utilisés pour l'étude du climat et du changement climatique ont avant tout été conçus pour étudier les processus physiques qui régulent le comportement couplé de l'atmosphère et de l'océan à l'échelle globale de la planète. Il s'agit alors de créer une planète numérique qui fonctionne en s'appuyant à la fois sur des lois fondamentales (celles du mouvement) et sur un bilan des échanges et transports d'énergie – cela réclame aussi des équations physiques un peu simplifiées, voire l'usage de lois plus empiriques, lorsqu'il s'agit par exemple de représenter des processus complexes tels que la transpiration de l'eau depuis les sols vers l'atmosphère *via* la végétation continentale.

Il n'existe pas de possibilité de résoudre de manière purement théorique l'ensemble d'équations que tout cela représente. On construit alors une approche numérique, qui correspond à une « maquette » de la planète Terre, où les calculs se font aux nœuds d'une grille de quelques dizaines ou centaines de kilomètres de maille, avec quelques dizaines de niveaux verticaux et un pas de temps de quelques heures, voire un peu moins. En quelque sorte, on « fait vivre » une planète artificielle qui est une « planète bis » par rapport à notre planète réelle. Il existe des possibilités mathématiques variées pour traiter ce problème : pour la moitié des modèles existants, par exemple, les calculs se font dans l'espace des « modes spectraux » de la sphère terrestre, plutôt que dans le monde physique.

La phase suivante consiste à comparer le comportement de cette « planète bis » à celui de la planète réelle. Pour cela, des exercices sont organisés de manières conjointes, sous l'égide du Programme Mondial de Recherche sur le Climat³ pour simuler des processus

3. Programme de recherche sur le climat mondial, mis en place en 1980. C'est une composante de l'Organisation météorologique mondiale, placée sous l'égide des Nations Unies, aussi liée à l'ICSU et à l'UNESCO.

différents, se produisant à des échelles de temps différentes, en utilisant le même code (en l'occurrence, il s'agit de codes de millions de lignes d'instructions).

Exemple : l'évolution du climat au XX^e siècle, dans toutes ses déclinaisons

Simuler correctement le cycle diurne, jour-nuit, avec les nuages, avec tout ce qu'il contient, a été un travail énorme. Simuler le cycle saisonnier, qui met en jeu de manière majeure les circulations océaniques, a aussi demandé de nombreuses années pour être maîtrisé. Mais il faut encore simuler les fluctuations qui concernent des échelles pluriannuelles proches des évolutions climatiques liées aux gaz à effet de serre, comme les fluctuations de type El Niño, et simuler les variations de tous ces aspects au cours de temps plus longs. Ce qu'on appelle « modéliser les évolutions du climat au XX^e siècle », ce n'est pas représenter de manière datée ce qui s'est passé au XX^e siècle, mais c'est comprendre tous les processus qui ont affecté les variabilités naturelles pendant cette période, être capable de les voir se produire dans nos planètes numériques de manière similaire au monde réel – mais avec des dates nécessairement différentes. Cela implique de faire le tri entre les processus qui doivent être retenus dans les équations, et ceux qu'il convient d'éliminer, parce qu'ils jouent un rôle mineur et impossible à représenter aux échelles considérées (les ondes acoustiques par exemple).

Il existe, mondialement, plus d'une vingtaine d'instituts qui ont développé plus d'une quarantaine de modèles, différents mais cousins. Un intense travail de comparaisons de tous ces modèles crée les conditions à la fois d'une coopération et d'une compétition entre instituts. Il n'existe pour le moment pas de modèle clairement supérieur aux autres : certains sont meilleurs pour certains processus physiques, certaines régions du monde, certains climats du passé, mais aucun n'est supérieur dans tous les domaines.

Le problème est complexe, il est aussi évolutif car on veut prendre en compte les résultats émergents qui précisent notre vision des processus dans différents domaines – par exemple la chimie de l'atmosphère, la végétation, le comportement marin ou l'étude des rétroactions des nuages. Pour prendre l'exemple des études de ces derniers, on avait comme indication principale à l'échelle du globe, dans les années 1970, des moyennes en longitude sur trois niveaux (nuages bas, moyens et hauts), provenant d'observations réalisées dans des stations météorologiques depuis le sol. Les données satellitaires, qui se sont progressivement affinées depuis les années 1980, mesurent tous les paramètres des nuages (la taille des gouttelettes, la taille des cristaux, leur altitude) depuis une dizaine d'années et transforment complètement le traitement du problème. Mais on commence donc seulement à avoir à la fois des données précises et un recul statistique suffisant pour vérifier de manière très ciblée le comportement des modèles dans ces domaines.

3 Scénarisation des climats futurs : la limite des 2 degrés à ne pas dépasser

3.1. Prévisions selon plusieurs modèles et scénarios

Les modèles ont été utilisés pour anticiper ce qui se pas-

sera dans le futur, selon plusieurs types de scénarios.

Au-delà d'exercices un peu académiques (impact d'un doublement du CO₂ atmosphérique), les premiers scénarios à vocation « réaliste » ont été établis par le GIEC (Groupe d'Experts Intergouvernemental sur

l'Évolution du Climat⁴) (**Figure 5**), qui a réalisé une synthèse des évolutions possibles de tout un ensemble d'éléments à l'origine des changements climatiques (les « *climate drivers* », ou facteurs de climats), mais externes au système climatique lui-même, comme la démographie, les développements technologiques dans le domaine de l'énergie, les types de mondialisation économique... À partir de ces éléments, le GIEC a défini des « scénarios marqueurs », qui ne désignent pas vraiment un « scénario minimal » ou un « scénario maximal », mais décrivent plutôt des évolutions des émissions des gaz à effet de serre cohérentes sur le plan socio-économique – qui ont été largement utilisées dans les rapports 2001 et 2007 du GIEC.

4. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est un organisme intergouvernemental, ouvert à tous les pays membres de l'ONU. Il « a pour mission d'évaluer, sans parti-pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les risques liés au réchauffement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation. Il n'a pas pour mandat d'entreprendre des travaux de recherche ni de suivre l'évolution des variables climatologiques ou d'autres paramètres pertinents. Ses évaluations sont principalement fondées sur les publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue ».

Dans ce cadre, le scénario « le plus vert » correspondait à des émissions d'un maximum de 10 milliards de tonnes de carbone par an vers le milieu de ce siècle, et décroissantes ensuite sous l'effet spontané des comportements des pays et des individus. Il se trouve que les hypothèses de ce scénario ont déjà été dépassées. À l'autre extrême, des scénarios prévoient un usage toujours croissant de l'énergie fossile. La **Figure 5** en donne un résumé extrêmement bref en présentant la moyenne globale des températures au sol, un paramètre qui résume les très nombreux résultats de ces modèles de manière simple. Cet indice de température globale se révèle très sensible à tout changement de fonctionnement du système climatique, et il fournit une échelle de mesure de l'intensité de ce changement.

La **Figure 5** présente pour chaque scénario les « barres d'incertitudes » (l'extension des lignes verticales situées à droite du diagramme), une donnée majeure que permet l'usage d'un ensemble de modèles différents. Cela fait ressortir la dispersion des prévisions des modèles, qui se situent dans une gamme de plus ou moins un degré environ, de part et d'autre de la moyenne de chaque scénario : les modèles ne permettent pas une prévision précise, mais mesurent une échelle de risque, au mieux de nos connaissances.

Les résultats n'en demeurent pas moins frappants : le scénario vert, déjà dépassé, est le seul qui (pour une petite par-

tie des situations) permet de rester en dessous du seuil de 2 degrés en 2100, mais sans rester stabilisé sous cette valeur. Ce seuil de 2 °C est utilisé dans les négociations internationales sur le changement climatique, depuis la convention de Copenhague. Ce n'est pas un seuil « scientifique » dans le sens où il ne nous protège pas de tout danger – la seule recommandation possible d'un scientifique serait de ce point de vue de ne pas changer le climat – mais il a l'avantage d'avoir été agréé par l'ensemble des pays de la planète comme un niveau de danger qu'il est nécessaire et possible de ne pas dépasser (l'accord de Paris a même demandé d'explorer les possibilités bien en dessous de 2°C). Dans les faits, et en dépit d'une prise en compte large de l'incertitude, tous les scénarios proposés initialement par le GIEC dépassent ce niveau.

Aujourd'hui, on est à un peu moins d'un degré de réchauffement, et le climat, s'il a déjà changé d'une manière qui devient clairement perceptible, reste relativement similaire à ce que l'on a connu en termes de type de fonctionnement (dynamique de l'atmosphère et des océans). Mais un climat de 4 ou 5 °C plus élevé, en revanche, serait aussi différent du climat préindustriel que celui d'un Âge Glaciaire, plus froid du même ordre de grandeur.

L'importance de ces résultats, le fait qu'aucun scénario ne résultant pas d'un effort politique dédié ne permette une stabilisation suffisante du climat, a incité les modé-

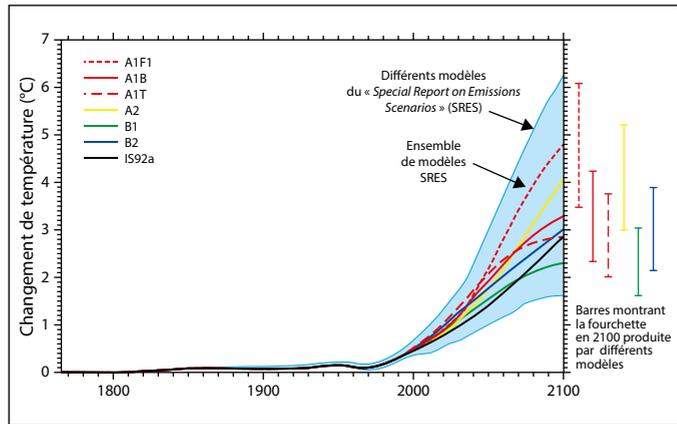


Figure 5

Évolution des variations des températures moyennes mondiales au cours des années observées et calculées par un exercice collectif de « scénarisation » des climats futurs. La limite des 2 degrés est dépassée en 2050, même dans les scénarios les moins alarmants.

Source : GIEC, 2001.

lisateurs à travailler par une « approche inverse ». On fixe un objectif (« Comment faire pour stabiliser le climat sous un réchauffement de 2 degrés ? ») et on utilise le modèle pour calculer ce que cela implique en termes d'émission de gaz à effet de serre (ce qui est possible aussi parce que les modèles comprennent aujourd'hui l'ensemble du cycle du carbone).

La **Figure 6**, basée sur le modèle de l'IPSL, montre les variations de température et les émissions de CO₂ dans l'atmosphère entre les années 1900 et 2100 dans plusieurs scénarios. La partie droite du graphique montre les variations des émissions de gaz à effet de serre associées à chaque cas. Les résultats rejoignent ce que l'intuition peut indiquer. Le fait que le CO₂ émis séjourne longtemps dans l'atmosphère a une conséquence directe : si

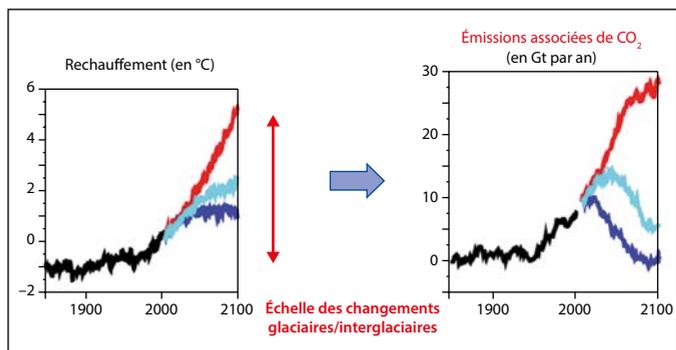


Figure 6

À gauche : variation des changements de températures entre 1900 et 2100 selon les données observées (en noir) et les différentes trajectoires modélisées par l'IPSL ; à droite : les émissions de CO_2 (en Gt/an) entre 1900 et 2100 qui permettent ces trajectoires : pour se stabiliser à 2°C de réchauffement (courbe en bleu foncé), il faut une diminution drastique puis une annulation des émissions.

Source : J.-L. Dufresne, LMD/IPSL.

l'on veut stabiliser la température, il faut fortement diminuer l'émission de CO_2 ! Ce qu'on appelle « l'objectif 2° » (limiter le réchauffement à 2°C en 2100) est en fait extrêmement difficile à réaliser : il impliquera de diminuer de 40 à 70 % les émissions de gaz à effet de serre dès 2050, pour atteindre dans la deuxième moitié du siècle un « équilibre carbone », voire des « émissions négatives », qui impliquent au contraire d'aller reprendre du CO_2 à l'atmosphère.

3.2. Les gaz à effet de serre : lien avec le changement climatique et décisions à prendre

L'analyse de l'ensemble des modèles mentionnés plus haut permet d'établir une corrélation entre un niveau cible de changement de température à la surface du globe et le cumul des émissions de gaz à effet de

serre (exprimés en équivalent CO_2) depuis 1870 (Figure 7). Ce résultat est bien sûr dépendant des modèles, mais il reflète et quantifie une donnée simple et robuste : les excédents de CO_2 (et de plusieurs autres gaz à effet de serre) apportés par les activités humaines restent présents dans l'atmosphère pendant des décennies ou des siècles ; il existe un moment où le total des émissions ne permettra plus de contenir le réchauffement sous un niveau de réchauffement donné. Nos émissions ont atteint un niveau près de dix fois plus élevé que celui de l'immédiat après-guerre. Dans ces conditions, l'indication des modèles est que le temps qui nous reste pour être en situation de ne pas dépasser 2°C (avec 66 % de chance compte tenu de la dispersion des résultats) est d'un peu plus d'une vingtaine d'années. Il ne s'agit que d'un ordre de grandeur, et ce réchauffement se produirait au-delà de ces vingt ans, mais ce calcul montre à quel point les effets possibles du changement climatique concernent un futur proche.

Deux questions se posent alors : quels scénarios de diminution des émissions de gaz à effet de serre doit-on mettre en œuvre pour empêcher un réchauffement trop élevé (on parle de mesure d'atténuation) et quelles seront les conséquences à anticiper selon que l'on s'y tient ou non (on parle alors d'« adaptation au changement climatique », et cela fera l'objet de la section suivante).

Pour répondre à ces questions dans le cadre des négociations en cours, un gros travail

a été effectué pour évaluer ce que seraient des trajectoires d'émission « possibles » compatibles avec l'objectif des 2 °C. Ces trajectoires possibles se doivent de respecter des contraintes variées : cumul des émissions de CO₂ se situant sous un niveau cible autorisé, disponibilité de technologies adéquates, etc. Elles peuvent différer par exemple au travers des hypothèses faites sur le mix énergétique utilisé, sur la date de mise en œuvre de telle ou telle mesure. Tout retard dans la mise en œuvre des mesures de réduction conduit à des réchauffements additionnels.

L'accord de Paris a été précédé d'une phase nouvelle dans les négociations climatiques. Les 195 États qui sont « Parties » de la Convention Cadre des Nations Unies sur le Changement Climatique, et ont donc été invités à la 21^e « Convention de Parties », la COP21, ont été invités aussi à soumettre une « INDC », c'est-à-dire une Intention de Contribution Déterminée Nationalement, explicitant ce qu'ils étaient prêts à accomplir dans le domaine de l'atténuation ou de l'adaptation au changement climatique. Ces intentions portent pour l'essentiel sur la période 2020-2030. Elles seront validées au moment de la ratification de l'accord, et seront ensuite rediscutées (à la hausse seulement) tous les cinq ans.

Un groupe français (le GICN, Groupe Interdisciplinaire d'analyse des Contributions Nationales), parmi plusieurs autres, a analysé la pertinence des efforts anticipés par les différents pays en amont de la

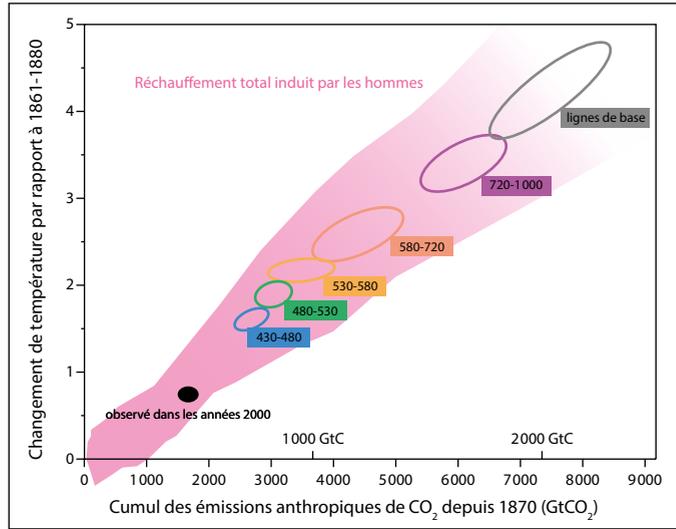


Figure 7

Le réchauffement climatique (en °C) en fonction des émissions cumulées de CO₂ de nature anthropique depuis 1870 (en gigatonnes de carbone ou de CO₂, respectivement Gt ou GtCO₂). Cette relation montre le poids des émissions passées.

Source : IPCC, AR5, WG1, 2013.

conférence de Paris, en regard des enjeux à long terme de la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Si l'on compare aux évolutions attendues sans ces contributions, les réductions qu'elles amènent sont notables, mais elles restent en gros insuffisantes d'un facteur 2 pour se trouver sur les trajectoires compatibles en fin de siècle avec un réchauffement maintenu sous les 2 degrés. La situation est meilleure si l'on autorise le recours à des formes de captations et de séquestration du CO₂ qui peuvent conduire à des émissions négatives.

L'analyse des INDC révèle aussi à la fois l'ampleur des enjeux et les nécessités d'un effort d'analyse importante. Les diminutions d'émissions de gaz à effet de serre néces-

saies tout au long du siècle pour rester sous les 2 °C représentent un effort considérable, amenant à se passer des combustibles fossiles en quelques décennies – effort dont la nécessité a été validée par la conférence de Paris, mais dont les conditions de réalisation restent à définir. Dans ce contexte, on ne peut se limiter au seul CO₂, auquel on résume souvent la problématique des gaz à effet de serre. La **Figure 8** est donnée pour illustrer la complexité des phénomènes qu'il faut maîtriser pour contrôler le réchauffement, pour passer des risques aux actions pratiques. Elle présente les

différentes modifications de la composition chimique de l'atmosphère par les activités humaines et l'estimation du forçage radiatif de la planète associé à chacune ; elle mentionne aussi la présence de gaz polluants, ou encore de particules et d'agrégats de particules qui jouent un rôle plus transitoire mais non négligeable, directement ou *via* leur action sur la couverture nuageuse. Les différents INDC exploitent l'ensemble des actions possibles qui résultent de ces effets multiples. Certaines propositions d'actions sont plus aisées (faire des économies d'énergie, supprimer certaines sources

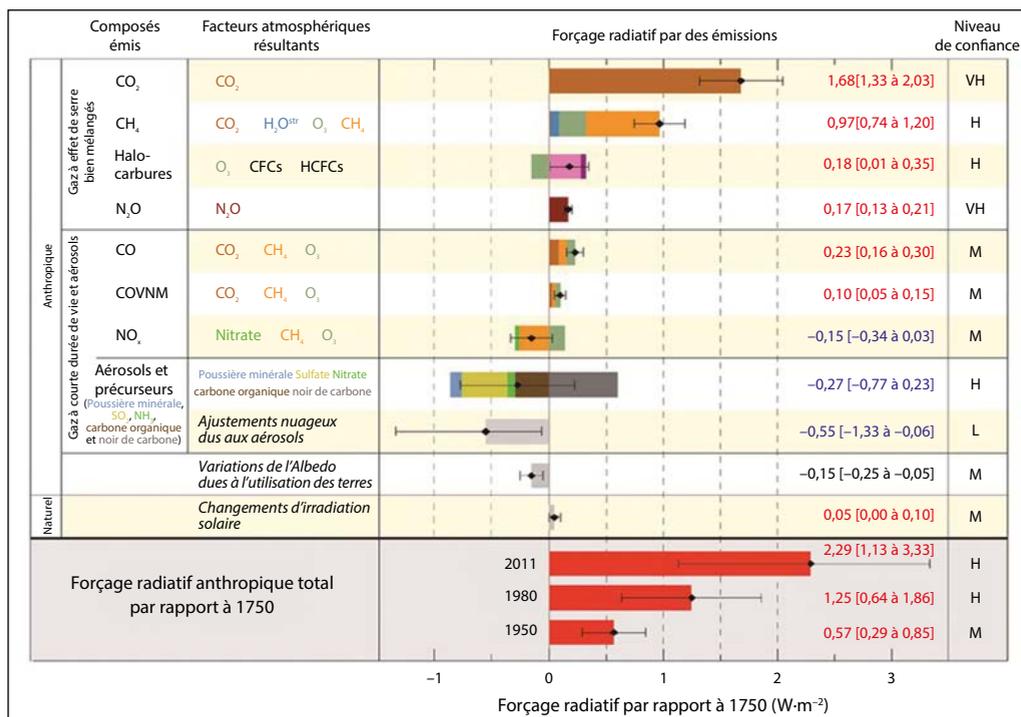


Figure 8

Nature et modification de l'impact radiatif (positive ou négative) des composés émis de manière anthropique dans l'atmosphère montrant la complexité potentielle des politiques de régulation. COVNM : Composés organiques volatils non méthaniques.

de méthane, agir sur les émissions de noir de carbone, modifier l'usage des sols, etc.). D'autres sont structurelles et très lourdes (remplacer les énergies fossiles par les énergies renouvelables, changer nos infrastructures de transport ou d'habitat) : il est essentiel qu'elles ne soient pas les dernières à être entreprises.

4 Les différents symptômes du changement climatique en fonction de modèles

La difficulté des actions à entreprendre pour limiter le réchauffement climatique à 2 °C a augmenté la crainte des pays les plus vulnérables, qui, lors de la conférence de Paris, ont porté une demande forte de limitation du réchauffement de la surface du globe à 1,5 °C plutôt que 2 °C, ainsi que des demandes d'aide à l'adaptation et à un développement non carboné. Le réchauffement de la planète a potentiellement des conséquences très profondes sur nos sociétés : elles sont de nature sociale, politique, nationale, internationale, elles touchent les questions d'alimentation, de biodiversité, et bien sûr de changement climatique, etc. Tous ces problèmes doivent être considérés lorsqu'on se préoccupe de l'adaptation au réchauffement de la planète. Cette section est consacrée aux impacts directement liés au changement climatique, et nous élargirons la perspective dans la suivante.

S'il y a une incertitude sur l'amplitude des changements climatiques en réponse à un

niveau d'émissions de gaz à effet de serre donné, il y en a beaucoup moins sur la distribution géographique du réchauffement lui-même, qui fait l'objet d'un consensus large, qui ne s'est pas démenti depuis le rapport Charney.

La **Figure 9** donne la distribution géographique des augmentations de températures de la planète calculé par le modèle de l'IPSL, à droite entre les années 2100 et 1990, pour un scénario bas (2 °C de réchauffement moyen) ou plus fort (plus de 4 °C de réchauffement), et à gauche entre la période préindustrielle et le dernier maximum glaciaire : là aussi le réchauffement est de 4-5° C. Le même modèle a été utilisé pour les deux calculs, en modifiant les paramètres qui sont différents pour ces deux périodes : direction de l'axe de rotation de la Terre, mouvement elliptique de la Terre autour du Soleil, composition chimique de l'atmosphère, topographie des glaciers polaires... Le fait que le modèle reproduise de manière qualitativement correcte les climats du passé conforte son application au calcul des évolutions climatiques futures.

De nombreux calculs ont été effectués avec les modèles proposés par les laboratoires internationaux. Les résultats de la **Figure 10** sont basés sur 32 modèles (RCP2.6, graphique de droite) ou 39 modèles (RCP8.5) qui ont fait le même exercice. Ils estiment les variations géographiques de températures entre deux périodes de vingt années (entre 1986 et 2005 ; entre 2081 et 2100). Les cou-

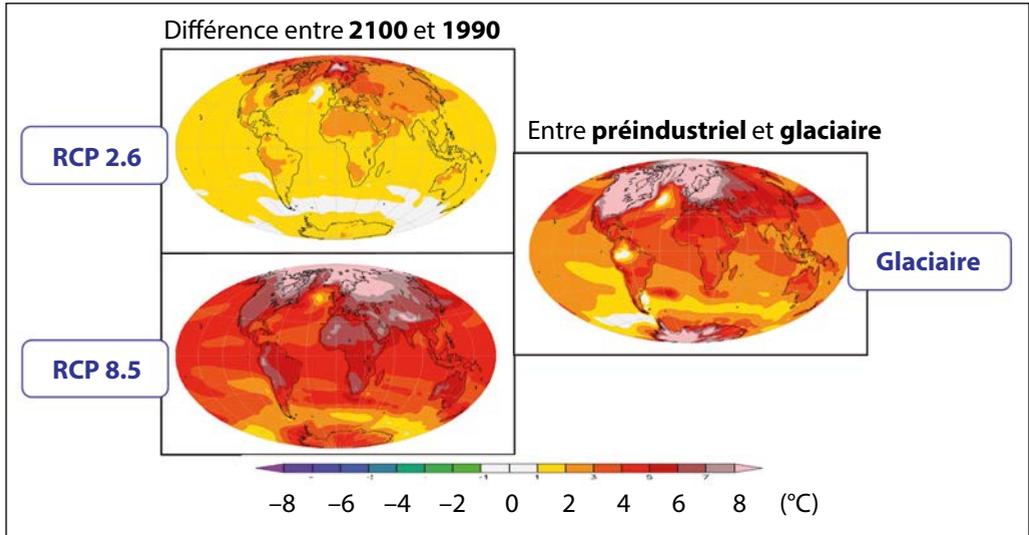


Figure 9

Cartes du monde représentant les changements de températures de surface simulées par le modèle de l'IPSL selon différents scénarios (profils représentatifs d'évolution des concentrations, dit RCP⁹). Le RCP2.6 correspond à un forçage radiatif de $2,6 \text{ W.m}^{-2}$ en fin de siècle, et à un réchauffement moyen de l'ordre de 2 °C . Le RCP8.5 correspond à un forçage radiatif en fin de siècle de $8,5 \text{ W.m}^{-2}$. L'évolution estimée pour 2100 est alors du même ordre de grandeur que celle qui nous sépare de l'ère glaciaire, telle que simulée par le modèle en accord qualitatif avec les données observées (carte de droite).

Source : IPSL-CM5A-LR.

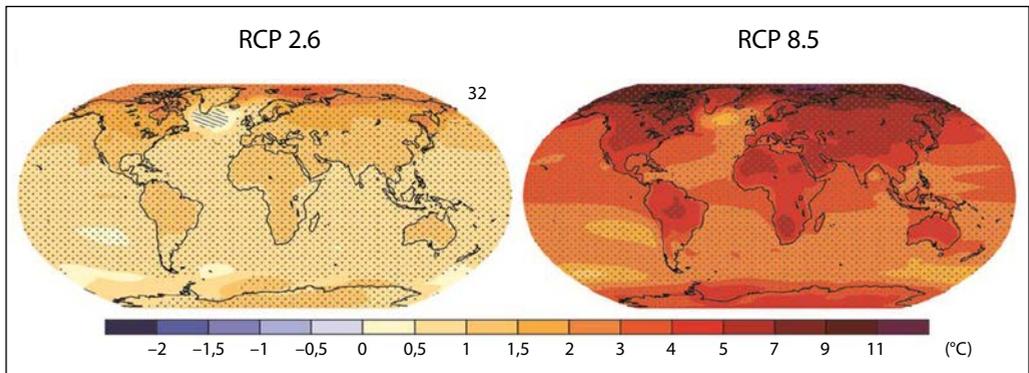


Figure 10

A) Estimation, sur la base de 32 modèles, de la variation de température au sol (entre moyenne 1986-2005 et moyenne 2081-2100) pour une augmentation globale de la température de 2 °C . On calcule un réchauffement important au Pôle Nord provoquant une fonte des glaces ; B) estimation, sur la base de 39 modèles, de la variation de température au sol (entre moyenne 1986-2005 et moyenne 2081-2100) pour une augmentation globale de la température de $4\text{-}5 \text{ °C}$; on ne voit pas de zones épargnées par ce réchauffement et on voit une augmentation de près de 10 °C pour l'Arctique.

5. RCP (Representative Concentration Pathways) : quatre scénarios relatifs à l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre au cours du XXI^e siècle, établis par le GIEC, et permettant de modéliser le climat futur.

leurs traduisent la moyenne des modèles. L'importance des gaz à effet de serre se voit par la comparaison des deux diagrammes. Les pointillés manifestent l'accord des modèles en termes de sens des évolutions (le diagnostic de réchauffement est un résultat presque général sur l'ensemble du globe).

Aujourd'hui, on commence à déceler des changements correspondants. Le modèle calcule un réchauffement dont la structure spatiale est voisine de celle que l'on observe : réchauffement plus fort sur les hautes latitudes, plus forts sur les continents. Le large ensemble de modèles, l'analyse de la variabilité observée et simulée, permettent aussi d'estimer la part des changements qui peut être associée à la composante naturelle et imprévisible de l'écoulement atmosphérique, et celle qui résulte d'un changement plus pérenne tel que l'augmentation des gaz à effet de serre. Cette dernière part ressemble beaucoup, en termes de structure spatiale, aux changements observés depuis plusieurs décennies. C'est ce qui a conduit le GIEC à dire, sur la base d'études statistiques quantitatives, qu'il existe 95 % de chances environ pour que les structures du réchauffement observé soient associées aux activités anthropiques. En d'autres termes, on ne sait aujourd'hui expliquer par la variabilité naturelle ces évolutions observées sur des échelles multidécennales qu'avec une probabilité très faible. On peut utiliser aussi le mot de « symptômes » pour ces évolutions parce que nous

savons que nous ne sommes qu'au début d'une histoire beaucoup plus longue. En termes médicaux : tout nous montre que la planète a développé une pathologie susceptible de s'aggraver fortement durant les prochaines décennies. Beaucoup d'autres indices renforcent ce résultat parce qu'ils montrent, comme pour les températures, une coïncidence qualitative entre les simulations des modèles et les premiers changements observés : le refroidissement de la stratosphère, l'élévation de la tropopause, l'évolution des précipitations à l'échelle globale, la fonte des glaciers continentaux, celle de la banquise arctique, les évolutions de la végétation ou des animaux. La notion de risque climatique découle de ces constatations : l'explication de ce qui se passe par l'augmentation des gaz à effet de serre est simple et directe, et elle en rend compte de manière plus complète qu'aucune autre hypothèse envisagée. Ceci n'écarte bien sûr pas la possibilité que d'autres processus puissent jouer un rôle : mais il est impossible d'ignorer le risque important lié aux gaz à effet de serre, et ce risque serait aggravé par l'existence simultanée de variations climatiques naturelles plus importantes qu'anticipé.

Tout ceci ne veut pas dire que l'on sait ou saura tout prévoir. En matière de changements, il y a lieu de distinguer plusieurs types de situations : certains changements sont très directement liés au réchauffement lui-même, mais d'autres sont beaucoup plus affectés par la part

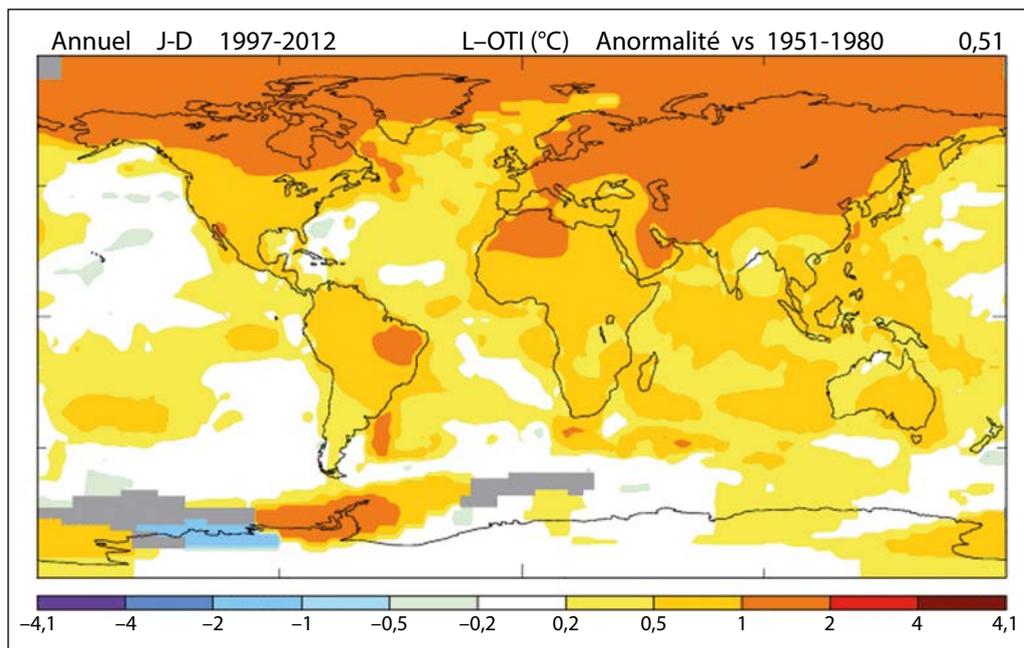


Figure 11

Réchauffement à travers le monde entre [1951-1980] et [1997-2012] : des changements observés en accord avec les prévisions donnant des preuves incontestables du phénomène de réchauffement climatique.

chaotique des mouvements atmosphériques ou des courants marins. L'atmosphère, par exemple, a un comportement suffisamment régulé pour qu'on puisse simuler ses caractéristiques statistiques à grande échelle d'espace et de temps, mais suffisamment chaotique pour qu'il soit impossible de reproduire de manière précise ce qui peut se passer à un moment donné et en un lieu donné. Cette variabilité naturelle du climat peut elle-même être affectée par le réchauffement climatique : on parle alors de « dérèglement climatique » plutôt que de « changement climatique », et de « risques climatiques » associés à ces dérèglements.

Nous pouvons illustrer cela en prenant le cas d'une variable très importante climatique, et très liée aux circulations atmosphériques : la précipitation. La **Figure 12** compare les changements de précipitations, et non de température, correspondant au scénario RCP2.6 (de l'ordre de 2 °C de réchauffement) et au scénario RCP8.6 (de l'ordre de 4-5 °C). Il s'agit donc de moyennes portant sur les résultats de plusieurs modèles et sur des périodes de deux décennies. Bien que ces moyennes filtrent une partie des évolutions aléatoires de courtes durées de vie, les couleurs indiquent des différences modélisées qui sont de l'ordre de 30 ou

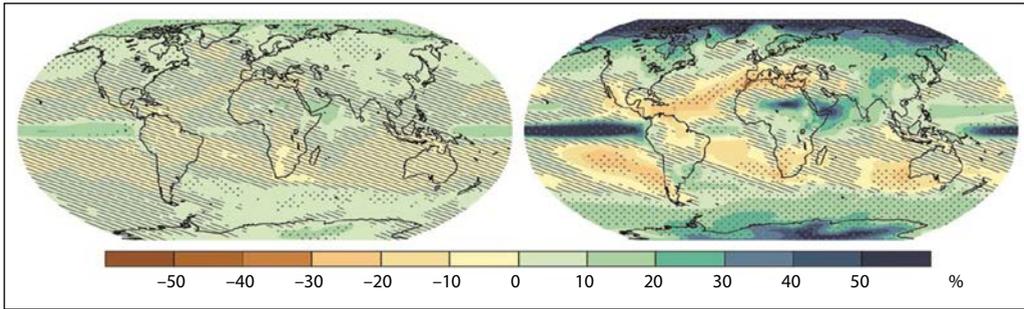


Figure 12

Changements moyens de précipitations de [1951-1980] à [1997-2012] pour un monde plus chaud de 2 °C environ (32 modèles) ou de 4-5 °C (39 modèles). On met en évidence une importante augmentation des précipitations au niveau de l'Équateur et des pôles (couleur bleue), ainsi que des zones en insuffisance avec de probables conséquences sur l'agriculture entre autres (couleur jaune). Les zones en pointillés sont celles où la localisation des changements fait consensus, les zones hachurées celles où elle ne fait pas consensus.

Source : IPCC, AR5, WG1, 2013.

40 %, ce qui est considérable. Elles tendent globalement à renforcer les contrastes actuels : les zones humides deviennent plus humides, et les zones sèches sud-tropicales deviennent plus sèches. Mais la surface couverte par les hachures sur cette figure montre aussi les zones où les modèles ont du mal à être d'accord entre eux. Ces zones sont peut-être pour une part celles où les modèles ont le plus besoin d'être améliorés. Mais il s'agit surtout de zones où la nature est plus difficilement prévisible, de manière intrinsèque, parce qu'elle a devant elle des choix que le hasard contribuera à arbitrer. Pour bien comprendre l'origine de ce phénomène nous pouvons prendre l'exemple de la région euro-atlantique. On y connaît quatre régimes de temps principaux, marqués par des positions différentes de l'anticyclone des Açores et de la dépression d'Islande. L'atmosphère oscille en permanence entre ces quatre régimes. Avec le

réchauffement de la planète, nous aurons d'une part une modification des conditions météorologiques propres à chaque régime (pluviosité plus forte, ou sécheresse et canicule plus intense, par exemple, selon les cas) mais aussi une modification de la durée temporelle passée dans chaque régime, qui va dépendre du couplage avec d'autres régions du monde qui sont aussi le lieu de fluctuations naturelles que le changement climatique peut modifier.

5 Le réchauffement climatique : au-delà de la problématique des sciences physiques et chimiques

S'agissant du problème climatique comme de bien d'autres, la notion de risque devient une notion essentielle quand on veut passer d'un message d'alerte à une politique d'actions. Au-delà de l'intensité des phénomènes météorologiques ou clima-

tiques eux-mêmes, le risque dépend de la vulnérabilité du système socio-économique, elle-même liée à l'exposition – selon que des zones concernées sont fortement habitées ou non (Figure 13). Les risques ainsi définis ne peuvent s'appréhender indépendamment d'un ensemble de facteurs très divers (sociaux, liés à la biodiversité, aux filières énergétiques). La notion de risque dépasse donc largement celle d'aléas naturels.

On ne peut donc pas parler d'action sur le climat ou pour se protéger des changements climatiques en restant confiné dans une sphère limitée aux

aspect les plus directs et les plus physiques du changement climatique. D'autres problèmes restreignent l'espace des solutions, et tout le travail de négociations, de maturation, doit conduire à des solutions équilibrées entre plusieurs points de vue. Le diagramme de la Figure 14 est issu du rapport du GIEC et montre l'importance d'itérations fréquentes dans les négociations, dans les prises de décisions, permettant des retours d'expériences et la prise en compte d'observations et de savoirs nouveaux. Nous avons vu que le climat change déjà, qu'il est appelé à

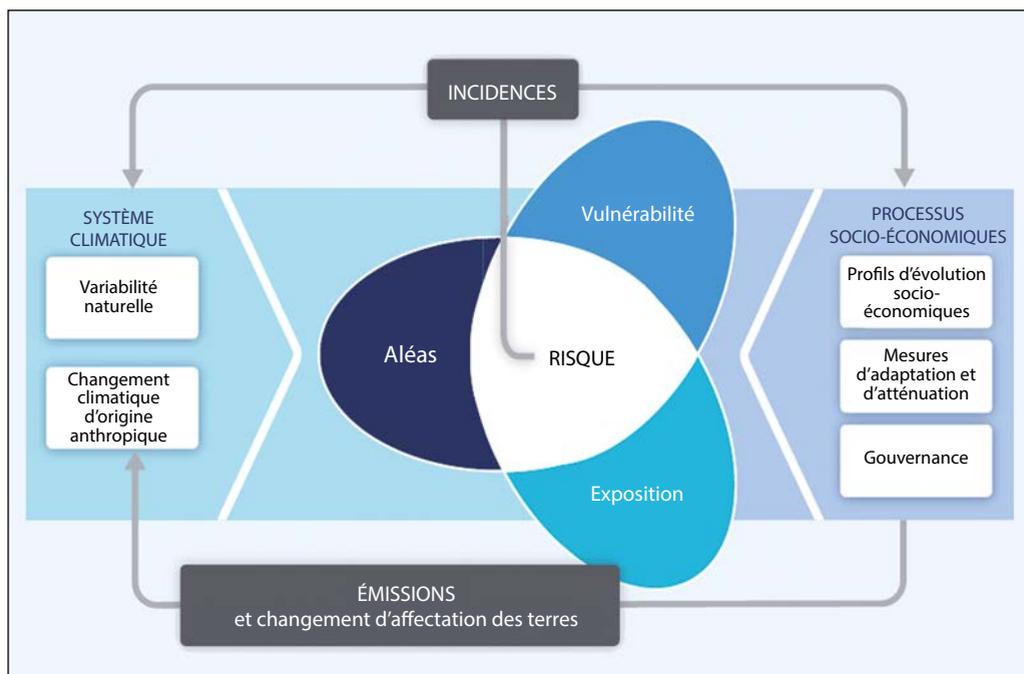


Figure 13

L'analyse des facteurs de risque liés à des événements climatiques extrêmes, par le GIEC : au-delà de la gravité des aléas climatiques eux-mêmes, les évolutions socio-économiques modifient la vulnérabilité et l'exposition à ces aléas. Les questions climatiques sont donc bien plus qu'un simple souci environnemental, que l'on pourrait traiter de manière isolée.

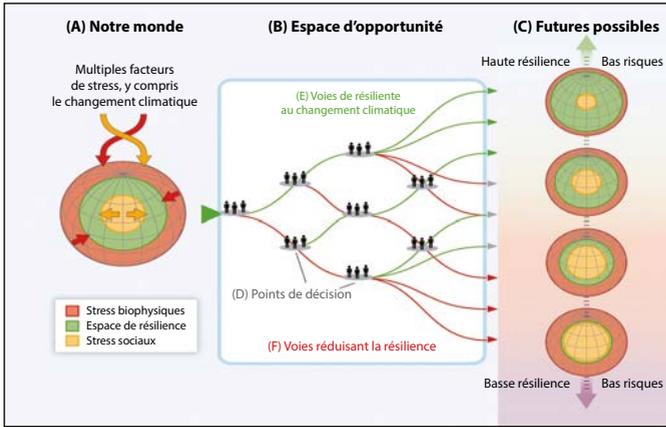


Figure 14

Le processus de prise en compte du changement climatique (GIEC, Groupe 2, 2014). Seul un processus itératif peut permettre de prendre en compte l'ensemble des processus qui entrent en jeu, pour les aligner les uns aux autres.

Source : IPCC (GIEC), AR5, WG2, 2014.

changer de manière amplifiée, et que les mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre, que l'on appelle d'ailleurs désormais des mesures « d'atténuation », ne pourront pas empêcher la nécessité de « s'adapter » à une part de changement pour partie inévitable. C'est cette nécessité qui donne aussi son importance à la détermination la plus précise possible de la nature des changements climatiques : l'origine des évolutions (gaz à effet de serre, fluctuations naturelles, autres forçages) a une incidence forte sur les mesures à prendre.

L'adaptation pose une autre question, essentielle : jusqu'où est-elle possible ? Le vivant est une illustration de ces limites. Il réagit de manière très rapide au réchauffement, avec des processus très contraints (voir par exemple l'**Encart : « L'influence du chan-**

gement climatique sur les ressources alimentaires »). Pour les animaux comme pour les espèces végétales, la vitesse de déplacement est déterminante (Figure 15). Souvent, ces vitesses sont inférieures aux vitesses attendues de translation des isothermes vers les Pôles (vers le Nord dans notre hémisphère) : l'adaptation sera alors impossible de manière directe. Dans tous les cas la gestion des espèces déplacées pose un problème : doit-on les laisser migrer, accueillir de nouvelles venues dans les aires protégées ? Ces limites à l'adaptation se manifestent dans d'autres domaines : la submersion d'un rivage, au-delà d'un certain niveau de montée des eaux, ne peut pas se traiter de manière douce. Il existe aussi des limites au niveau du réchauffement tolérable. L'adaptation ne peut pas tout résoudre et

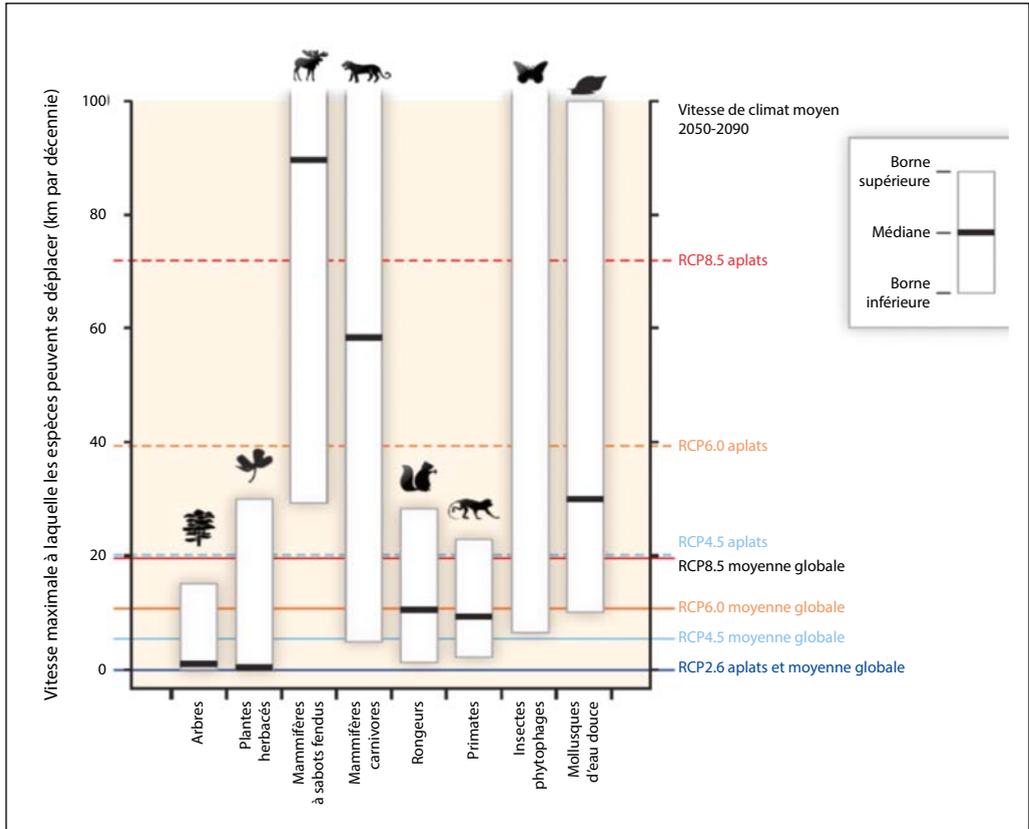


Figure 15

Diagramme des vitesses de déplacements possibles (en km/10 jours) en fonction des espèces : une inégalité sur l'espérance de survie des espèces animales comme végétales impliquant ainsi la disparition de nombreux spécimens pour un réchauffement climatique global de 4-5 °C. Exemples : faibles vitesses de déplacements pour les arbres et les primates mais plus importantes pour les mammifères carnivores, les insectes et les mollusques.

Source : IPCC (GIEC), AR5, WG2, 2014.

ne supprime en rien le besoin de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Ces processus d'adaptation touchent dans certaines régions du monde des nécessités vitales (voir aussi l'**Encart : « L'influence du changement climatique sur les ressources alimentaires »**). Mais même dans des régions moins vulnérables, ils constituent un processus social nécessaire d'appropriation et d'analyse des problématiques climatiques et environnementales.

6 Les enjeux de l'adaptation : les besoins d'une expertise à la portée des citoyens comme des décideurs

6.1. Quelle approche utiliser : illustration à partir d'une approche consacrée à l'Aquitaine

Pour donner une image du changement climatique qui soit utile au champ de la décision, il faut sortir du domaine de l'analyse simplifiée des

L'INFLUENCE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RESSOURCES ALIMENTAIRES

Le changement climatique est susceptible d'entraîner une modification de la capacité agricole des sols et touche donc la production des ressources alimentaires. Il est indispensable de prendre les paramètres démographiques en compte pour évaluer ses effets.

L'exemple de l'Afrique est particulièrement frappant. Le **Tableau 1** donne les estimations de la croissance des besoins alimentaires entre 2000 et 2050 sous l'effet du réchauffement climatique et de la démographie selon les continents. Il est d'un facteur cinq environ, pour l'Afrique. Les situations sont très inégales selon les continents.

Tableau 1

Croissance des besoins alimentaires par continents entre 2000 et 2050 (base 1 en 2000) sous l'effet combiné du réchauffement climatique, de la croissance de la population, de la modification de sa composition (âge, sexe) et du régime alimentaire. On constate des inégalités, et l'Afrique est le continent le plus touché.

Continent	Besoin alimentaire à l'horizon 2050
Afrique	~ 5
Asie	~ 2,5
Europe	~ 1
Amérique latine	~ 2
Amérique du Nord	entre 1 et 1,5
Océanie	~ 1,5

Source : d'après Collomb 1999, FAO, et Benjamin Sultan (résultats présentés de manière arrondie).

Nous subirons des conséquences très inégales face au réchauffement. Dans des régions déjà chaudes, entre -30° Sud et +30° Nord, le facteur d'augmentation de température, à lui tout seul, et quels que soient les changements de précipitations plus difficiles à évaluer, agit de manière négative sur la production primaire de matière végétale. En dehors de ces zones, au contraire, on pourra assister à la croissance des forêts et de la végétation (**Figure 16**).

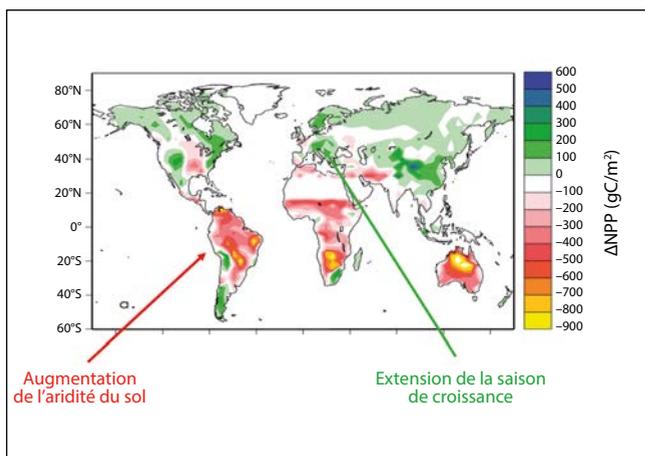


Figure 16

Modélisation simple de la production primaire nette de végétation au travers des continents en réponse au réchauffement, d'après une étude pionnière qui a été suivie de beaucoup d'autres. Elle met en évidence une réponse fortement modulée géographiquement, avec des régions intertropicales affectées de manière très négatives, alors que les régions extratropicales peuvent au contraire voir une croissance augmentée de la végétation.
Source : Berthelot et coll., 2002.

enjeux qui a accompagné la phase d'alerte sur ces problèmes. Les notions clés sont celles de « vulnérabilité » ou de « risque ». Comme tout n'est pas prévisible en détail dans l'évolution climatique future, il convient d'anticiper et de prévenir les situations les plus dommageables. Cette analyse de ce que l'on veut protéger va au-delà des simples critères de la science climatique. On veut par exemple éviter que le changement climatique ne crée des injustices, pour des raisons qui sont d'abord d'ordre éthique, et qui touchent aussi la sécurité de nos sociétés. On veut aussi préserver les ressources de la planète, et au premier rang d'entre elles les ressources de la biodiversité, dont dépendent les êtres vivants que nous sommes.

Il existe pour cela un très large éventail de résultats scientifiques disponibles dans les laboratoires publics, qui sont produit chacun pour un usage et dans un contexte précis, mais qui, tous ensemble, peuvent dessiner un panorama plus large des impacts possibles du changement climatique. Nous citons ici, à titre d'exemple, un travail illustratif de la situation qui prévaut dans de nombreuses régions, qui a été réalisé en Aquitaine. Les conclusions de cette étude sont données dans le livre *Les impacts du changement climatique en Aquitaine* (Presses universitaires de Bordeaux, 19 septembre 2013). Près de 150 chercheurs confirmés ont permis d'aborder dans leur diversité les conséquences du changement climatique sur

l'eau, la vigne, l'agriculture, les forêts, les montagnes, la qualité de l'air, la santé, la biodiversité, la pêche, etc. Un tel travail donne du changement climatique une image documentée aux mieux des connaissances actuelles. Il donne aussi une vision systémique du risque climatique que l'on peut ainsi confronter à d'autres risques, risques sociaux-économiques, ou liés à la biodiversité, à l'alimentation, à la production d'énergie, etc.

L'adaptation au changement climatique met aussi en jeu des échelles de temps particulières, que nous illustrerons ici par un seul exemple : celui du littoral. Il existe de ce point de vue une différence marquée entre le problème de l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre et celui de l'adaptation au changement climatique. L'atténuation, pour être efficace, doit en effet commencer sans attendre, car les gaz se stockent durablement dans l'atmosphère, sans retour en arrière possible. Mais l'effet de ces gaz est différé dans le temps, en grande partie par l'inertie thermique des océans. Ce délai, limité, offre un temps qui peut être socialement celui de la discussion, de la démocratie, et des recherches collectives de solutions.

En Aquitaine, il existe un littoral lagunaire important, celui de la Gironde. La **Figure 17** donne (en rouge) des estimations⁶ des zones qui risquent

6. Études du laboratoire Environnements et Paléoenvironnements Océaniques et Continentaux (EPOC) à Bordeaux.

d'être submergées de manière fréquente, dommageable, par la montée du niveau de la mer. Cette montée, estimée entre 50 et 100 cm en fin de siècle au niveau global, est soumise à des aléas locaux : difficultés du fleuve à s'écouler, étiages⁷ différents, reflétant des pluviométries modifiées ; ou des régimes modifiés de fonte de neige sur les Pyrénées (**Encart : « Changement climatique et débat public : la question des zones inondables »**).

6.2. Éduquer la population : une priorité pour pouvoir prendre les décisions qui s'imposent

Les changements qui sont devant nous nous obligeront à croiser des domaines très différents : le climat, l'énergie, mais aussi l'organisation de nos sociétés face à l'agriculture, la gestion de l'eau, etc. Pour bien traiter ces questions, pour faire comprendre et accepter des choix qui seront souvent des compromis entre plusieurs contraintes opposées, pour donner aussi une force suffisante à l'opinion publique pour qu'elle puisse peser et aider ses élus face à différents lobbies, il faut que les citoyens soient éduqués et comprennent les enjeux, de manière suffisamment précise.

Pour apprécier le chemin à parcourir, on peut s'appuyer sur des enquêtes d'opinion, telles que celle qui est réali-

7. Étiage : correspond statistiquement (sur plusieurs années) à la période de l'année où le niveau d'un cours d'eau atteint son point le plus bas.

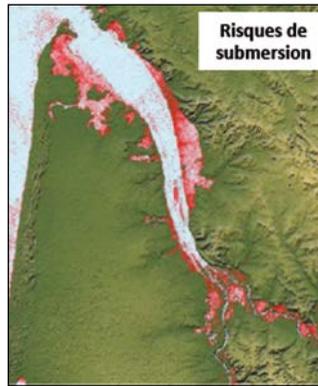


Figure 17

Estimations des zones qui risquent d'être submergées par la montée de la mer au niveau de la Gironde.

Source : Bruno Castelle, EPOC/CNRS/Université de Bordeaux.

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET DÉBAT PUBLIC : LA QUESTION DES ZONES INONDABLES

Face à des zones menacées de submersions, que faire ? La réponse est souvent : rien, par passivité, incapacité à prendre des décisions, ou au contraire de manière calculée. Le risque est alors de voir disparaître en quelques dizaines d'années des zones de travail et d'habitat, imposant une migration forcée aux populations concernées. À contrario, protéger ces zones menacées peut imposer des travaux importants, et réclame des décisions collectives, comprises et acceptées par les citoyens.

Il y a par exemple, en Aquitaine, une côte sableuse protégée par des dunes. Elle est soumise à un mécanisme d'érosion, qui est très marqué lors des tempêtes, tempêtes dont la modification en réponse au changement climatique constitue un aléa difficile à évaluer. L'état des dunes est donc un facteur de protection très important, et le Conservatoire du Littoral a accompli au cours des dernières décennies un travail remarquable de restauration de ces paysages très fragiles. Encore faut-il être du bon côté de la dune. Cette question se pose par exemple à Lacanau, une ville qui n'est plus protégée par un cordon dunaire, et devrait reculer pour ne pas être soumise à des risques trop importants. Plus au Nord la région du Verdon pose des questions analogues, dans un contexte géographique un peu différent à l'abord de l'estuaire de la Gironde, questions mises en lumière par l'abandon nécessaire du bâtiment « Le Signal ».

Ce qu'impose l'aléa climatique, ce sont donc des politiques de vigilance, de réduction des risques, de restauration des zones littorales, de maîtrise des constructions, d'abandon des zones les plus dangereuses. Bien sûr le diagnostic scientifique n'est qu'un des facteurs de décision. Mais on estime parfois qu'il y a 7 millions d'habitations en zones inondables en France. Le changement climatique impose à cet égard un facteur supplémentaire de vigilance.

sée annuellement par Daniel Boy du Centre de Recherches Politiques de Sciences Po, anciennement Centre d'Études de la Vie POLITique Française (CEVIPOF) de Sciences Po, et par l'Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME). Elle montre qu'une très large partie de l'opinion est désormais consciente de l'existence d'un problème climatique et le considère spontanément comme un problème majeur. Mais quand vient une ques-

tion ouverte plus précise : « *En quoi consiste selon vous l'effet de serre ?* », 14 ou 15 % de la population seulement répond en évoquant l'existence de gaz, de CO₂ (**Tableau 2**). Malgré les efforts marqués de l'Éducation Nationale on est manifestement encore très loin d'une compréhension des enjeux suffisante pour que l'opinion publique puisse être à un niveau suffisant l'un des appuis des décideurs dans la mise en place des transitions nécessaires.

Tableau 2

Les résultats du sondage à la question « En quoi consiste selon vous l'effet de serre ? » mettent en évidence un grand besoin d'éducation de la population en France et ailleurs sur les problèmes environnementaux.

Intitulé de la catégorie	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
La pollution, les déchets	11	15	18	24	21	25	24	23	24	20	20	28	28	27
Couche d'ozone	19	15	27	22	24	25	26	24	25	23	21	22	23	23
Des gaz, le CO ₂	12	14	10	13	13	14	12	17	17	17	16	14	14	12
Chaleur, rechauffement	22	25	21	18	16	13	18	18	16	21	17	18	16	18
Autres réponses	5	3	4	3	5	3	4	3	3	5	6	3	3	5
Le manque d'air	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	1	1	1	1
Sans réponse	30	27	19	19	20	19	14	13	13	12	19	14	15	14

Source : Daniel Boy, Sc. Po. Cevipof 16 (04/2013).

Pour un partage démocratique des décisions

Pour traiter les problèmes du changement climatique de manière cohérente et efficace (c'est vrai pour la France, c'est vrai pour l'ensemble des pays de la planète), l'éducation à la compréhension plus profonde des enjeux est capitale. Elle doit accompagner la transition entre une phase d'alerte et une phase de

prise de décisions, de recherche de solutions, qui réclame des choix complexes.

Aujourd'hui, de nombreuses enquêtes le montrent, la compréhension de ces problèmes, malgré des avancées importantes, reste insuffisante. Une appropriation de ces enjeux par l'opinion publique est nécessaire, car elle conditionne des décisions qui seront nécessairement des décisions de compromis compliqués entre des contraintes sociales et environnementales opposées, mais aussi des décisions prises face aussi à des intérêts et des lobbys qui ne représentent pas l'intérêt public. Les scientifiques ne peuvent pas décider à la place des citoyens et des élus. Mais ils ont un rôle et une responsabilité considérable en termes de médiation scientifique, d'éducation et d'évaluation des mesures qui seront prises à la suite de la COP21. L'éducation formelle, à l'école, au lycée, à l'université ou dans les entreprises, joue un rôle très important. Mais l'échelle territoriale, celle de collectivités locales où chacun peut s'impliquer, doit elle aussi contribuer fortement, et par l'exemple, à cette formation nécessaire des citoyens.

La compréhension du changement climatique, de ses sources à sa modélisation : questions encore ouvertes ?

Vincent Courtillot est professeur Émérite de géophysique et de géodynamique¹ à l'Université Paris-Diderot. Ancien Directeur de l'Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP²), il est membre de l'Académie des Sciences et membre honoraire de l'Institut Universitaire de France. Il a présidé l'Union Européenne des Géosciences, qui lui a discerné la médaille Holmes, ainsi que la section géomagnétisme³ et paléomagnétisme⁴ de l'American Geophysical Union.

La vision du changement climatique proposée dans ce chapitre n'est pas celle à laquelle la majorité des scientifiques adhèrent aujourd'hui. Cette vision, que je pense naturellement juste, doit nourrir un débat scientifique sur la compréhension du système climatique, système de très grande échelle, turbulent, non

linéaire, fait d'enveloppes très différentes mais couplées, bref un système extraordinairement complexe. Je me concentre sur les observations qui doivent permettre d'identifier les sources du changement climatique, au moins de manière qualitative. On ira ensuite vers la modélisation, qui ne peut rendre

1. La géophysique concerne l'étude des caractéristiques physiques de la Terre (et d'autres planètes) en utilisant de nombreuses techniques d'observation et de modélisation des phénomènes naturels ; elle comprend notamment le géomagnétisme, la sismologie, la gravimétrie, la géodésie. La géodynamique concerne l'étude de la dynamique du globe terrestre à toutes les échelles de temps, d'espace, de profondeur. Elle s'appuie sur les apports de la géologie, de la géophysique, de la géochimie et de la science des matériaux.

2. www.ipgp.fr

3. Le géomagnétisme concerne l'étude du champ magnétique terrestre, dont les origines sont à la fois internes (effet dynamo dans le noyau) et externes (influence du Soleil) à la Terre.

4. Le paléomagnétisme désigne l'étude du champ magnétique terrestre passé ; c'est notamment l'outil qui a permis de mesurer la vitesse de dérive des continents.

compte que de ce qu'on y a introduit comme mécanismes et comme hypothèses. La vision majoritaire actuelle du changement climatique et la modélisation qui l'accompagne sont exposées dans le **Chapitre de H. Le Treut** de cet ouvrage *Chimie et changement climatique* (EDP Sciences, 2016).

1 La vision majoritaire du « changement climatique »

Les principaux aspects de la vision majoritaire du changement climatique sont – rappelés de façon très simplifiée – les suivants (cf pour un exposé complet le **Chapitre de H. Le Treut**) :

(1) La température globale moyenne de la basse atmosphère (un concept dont la signification thermodynamique est loin d'être évidente) a augmenté d'environ 0,7 °C depuis 100 à 150 ans. Presque tous les chercheurs, une grande partie des minoritaires compris, acceptent ce point, mais la description et l'importance de ces variations font l'objet de débat.

(2) C'est le dioxyde de carbone (CO₂) d'origine anthropique (dont il est incontestable qu'il est émis par l'homme de façon accélérée depuis le début de l'ère industrielle) qui est responsable de ce réchauffement global, à cause de ce qu'on appelle de façon impropre l'effet de serre. Ce terme est en fait impropre parce qu'une serre a un toit, dont le rôle est essentiel dans la préservation de la chaleur, tandis que l'atmosphère n'en a pas.

(3) Un troisième point est que les variations de l'activité du Soleil sont estimées avoir des conséquences négligeables, en ce qui concerne les modifications du climat observées depuis environ un demi-siècle. Le rôle du Soleil au cours des milliards d'années passées et jusqu'en 1950 n'est en revanche contesté par personne.

Le débat porte sur les mécanismes du réchauffement observé et sur les rôles respectifs du Soleil et du CO₂ dans ce réchauffement récent.

Certains grands chercheurs des disciplines climatiques et de nombreux médias ont cru pouvoir affirmer au cours de ces dernières années que la compréhension du changement climatique était un problème résolu et que la vision majoritaire rappelée ci-dessus était la bonne. Je plaide ici le droit au débat et à l'existence d'un autre point de vue, actuellement minoritaire, mais cependant partagé par un nombre de chercheurs qui est loin d'être négligeable, comme on le lit ici ou là. Les arguments qui posent problème à la vision majoritaire du changement climatique sont forts et nombreux.

2 La « science du climat » : une science jeune appliquée à des phénomènes anciens

En tant que géophysicien, je suis attaché aux observations. Même si cela peut paraître étonnant, un géophysicien peut (doit ?) s'intéresser au climat. Avec les outils dont il dispose, il peut être amené à

montrer que les modèles disponibles à un moment donné ne rendent pas bien ou pas totalement compte des observations, y compris des siennes ; il pose alors des questions utiles pour la recherche et peut contribuer aux solutions. C'est évidemment aussi le cas de nombreuses autres disciplines, qui peuvent apporter beaucoup, comme elles le font depuis des décennies, à la « climatologie ».

La science du climat est en fait une science jeune dans laquelle à peu près toutes les disciplines scientifiques ont des choses importantes à dire. J'ai été amené à m'intéresser aux sujets climatiques par des chemins inattendus, notamment pour un géophysicien (comme c'est souvent le cas en recherche). De la dérive des continents et de la collision entre l'Inde et l'Asie, qui est responsable de la surrection de l'Himalaya et de la formation du grand plateau tibétain, je suis passé à l'étude du volcanisme massif qui s'est produit il y a environ 65 millions d'années en Inde, et de là à faire face à « l'extinction des dinosaures » puis aux problèmes d'extinction en masse des espèces. J'ai été amené à montrer que l'évolution de la vie au cours des cinq cents derniers millions d'années de l'histoire de la Terre a été forgée par un petit nombre d'éruptions volcaniques brèves et gigantesques. À chaque étape de cette carrière de chercheur, une observation inattendue conduisait à « sauter » d'un problème à l'autre, d'une série de disciplines à une autre. C'est l'un des aspects fascinants de la

recherche dans le domaine si vivant des sciences de la Terre, qui a connu une grande révolution avec l'avènement de la tectonique des plaques dans les années 1960-1970.

La plus célèbre des extinctions en masse est celle de la limite dite Crétacé-Tertiaire, il y a 65 millions d'années, qui a vu entre autres la disparition des fameux dinosaures, pour laquelle deux théories, représentées de façon humoristique par les deux dessins de la *Figure 1*, se sont affrontées pendant un quart de siècle :

- l'idée qu'un astéroïde était responsable à lui seul de cette extinction ;
- l'idée que des éruptions volcaniques gigantesques en étaient responsables.

Un article récent paru dans *Science* vient de confirmer que la vision volcanique, que je défends depuis trente ans en étant minoritaire et parfois ultra-minoritaire, était probablement la bonne. En passant du paléomagnétisme à la dérive de l'Inde, puis à la datation du volcanisme du Deccan en Inde, puis à la dynamique de ce volcanisme géant et notamment celui des gaz injectés dans l'atmosphère, nous étions passés naturellement de la géophysique à la climatologie. Avec des collègues spécialistes de modélisation climatique (principalement Frédéric Fluteau à l'IPGP), nous avons donc essayé de modéliser les conséquences de ces éruptions - heureusement, sans équivalent historique ou récent - dans lesquelles le rôle du dioxyde de carbone et surtout, semble-t-il, celui du dioxyde de soufre sont essentiels.

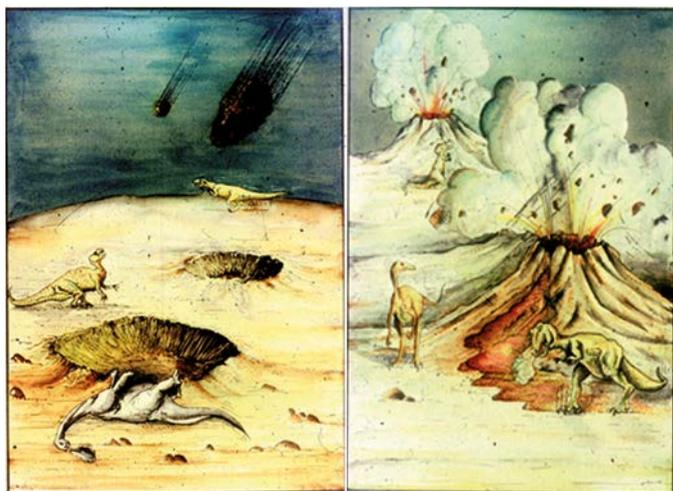


Figure 1

L'extinction des dinosaures est-elle due à une météorite ou à de gigantesques éruptions volcaniques ?

Source : dessins de Joël Dyon, IPGP.

3 L'évolution du climat sur de longues périodes (du siècle au million d'années)

Le climat est défini, de façon simple, comme « la moyenne de la météorologie sur trente ans ». De nombreux paramètres – température, pression, précipitations, vent, insolation⁵, nébulosité⁶ – sont nécessaires pour décrire complètement la météo et le climat sur ces moyennes de temps.

Pour étudier le climat, il faut en outre observer (de manière directe ou indirecte) des échelles de temps emboîtées de plus en plus anciennes.

5. Insolation : durée d'exposition d'un site au Soleil et bilan thermique en résultant.

6. Nébulosité : valeur de la couverture nuageuse, observée à diverses altitudes.

3.1. Les périodes glaciaires et interglaciaires

Commençons par le remarquable travail des géochimistes-isotopistes⁷ qui, en extrayant des carottes de glace de milliers de mètres de longueur de l'Antarctique et du Groenland (voir le *Chapitre de M. Legrand* dans cet ouvrage *Chimie et changement climatique*, EDP Sciences, 2016), ont réussi à reconstituer l'évolution de certaines caractéristiques climatiques régionales sur 450 000 ans (*Figure 2*) et notamment :

- de la température moyenne de l'atmosphère dans ces régions, déterminée à partir de l'évolution des rapports isotopiques de l'oxygène ;

- de la concentration en gaz carbonique de l'atmosphère, mesurée dans des bulles emprisonnées dans la glace.

On voit sur l'échelle de droite que la température moyenne (en bleu) varie de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$, par rapport à une moyenne prise comme référence. On repère sur cette courbe les glaciations avec leur périodicité ou leur quasi-périodicité de 100 000 ans. On voit que, tous les 100 000 ans environ, on entre dans une période glaciaire de façon un peu chaotique.

7. Géochimiste-isotopiste : scientifique qui étudie les composants chimiques de la Terre (et des autres planètes), leurs transformations et leurs propriétés isotopiques. Par exemple, l'étude des rapports des concentrations en isotopes 16 et 18 de l'oxygène permet de remonter aux processus qui accompagnent le cycle de l'eau (évaporation, transport, précipitation) et notamment, moyennant certaines hypothèses, à la température à laquelle se sont effectués ces processus.

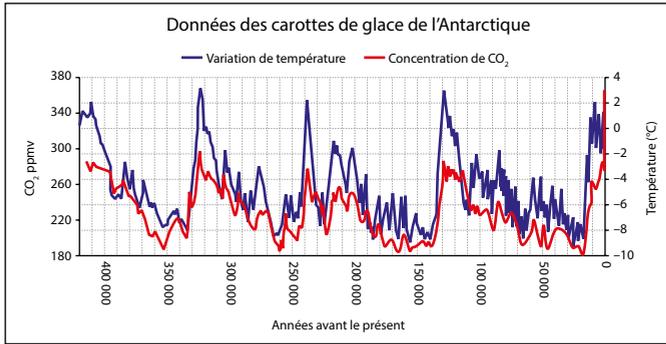


Figure 2

Évolution de la concentration en CO_2 dans l'atmosphère et de la température depuis 450 000 ans. La température moyenne est représentée en bleu. L'évolution de la concentration en CO_2 est en rouge.

tique et lente, puis on en sort par une série de périodes de dégel, qui, elles, sont rapides, parfois extrêmement rapides, pour arriver dans les périodes interglaciaires, beaucoup plus courtes.

Nous vivons actuellement dans une telle période interglaciaire (plus chaude) à un moment de l'histoire géologique de la Terre où celle-ci connaît pourtant la plupart du temps les glaciations. Or il faut savoir que, pendant la plus grande partie de l'histoire de la Terre, il n'y a pas eu de glaces ; les périodes glaciaires sont des périodes géologiquement rares.

La courbe rouge de la *Figure 2* donne l'évolution de la concentration en CO_2 mesurée sur l'échelle de gauche. On voit que les courbes rouge et bleu, sans aller trop dans le détail, sont bien corrélées. Bien que, on le sait, corrélation n'implique pas forcément causalité, une telle corrélation suggère plus que fortement une relation de cause à

effet. Mais dans quel sens ? Est-ce que la température « piloterait » la concentration de l'atmosphère en CO_2 ? Ou le contraire ? Ou bien un autre agent déclencherait ces deux variations concomitantes ?

Il est pratiquement impossible de savoir si l'une des courbes précède l'autre, à l'échelle de temps de la *Figure 2*. La plupart des chercheurs pensent qu'à la sortie d'une période glaciaire, c'est d'abord la température qui augmente ; le « facteur forçant » est l'ensoleillement, qui varie avec les cycles orbitaux du Soleil⁸. Le réchauffement des eaux de l'océan conduit alors à un dégazage d'une partie du CO_2 qui y était dissout.

Certains chercheurs pensent que dans un premier temps la température augmente en effet et que l'océan mondial

8. Ou cycles de Milankovic, liés à des perturbations de l'orbite elliptique de la Terre autour du Soleil, principalement dues à l'attraction gravitationnelle des planètes géantes.

dégaze, augmentant la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique ; mais ils pensent que le gaz carbonique entraînerait ensuite un réchauffement de l'atmosphère par effet de serre (effet de rétroaction). La réalité d'une telle rétroaction est l'un des nombreux éléments du débat qui ne sont pas tranchés. Il n'en reste pas moins que le Soleil paraît bien être le principal déterminant des cycles de Milankovic illustrés par la **Figure 2**.

Depuis la fin de la dernière glaciation il y a 18 000 ans, la température dans les régions étudiées s'est réchauffée de 6 °C à 8 °C – ce qui a été bénéfique pour le développement de toutes les populations humaines, qui a été rendu possible par cette dernière période de réchauffement –, et le niveau moyen des mers s'est élevé de 125 mètres. Ces chiffres, issus des recherches paléoclimatiques⁹, rappellent que les variations de températures peuvent se faire de façon très rapide, autant les hausses que les baisses ; les hausses du niveau de la mer, en particulier, peuvent être relativement rapides. L'homme a toujours connu le changement climatique, avec des échelles de temps et des amplitudes très variées. Il semble s'y être assez bien adapté.

3.2. L'évolution du climat au cours des derniers millénaires

Pour ce qui est de l'étude de l'amplitude et de la vitesse

9. La paléoclimatologie est la science qui étudie les climats passés et leurs variations.

de variation de la température à l'échelle de mille ans, une courbe d'apparence très inquiétante réalisée par Michael Mann en 1998 a figuré de nombreuses fois dans le troisième rapport du Groupe Intergouvernemental d'Étude du Climat (GIEC¹⁰) (**Figure 3**). La température représentée par la courbe de droite en orange est obtenue par des mesures thermométriques. Celle de gauche, en vert, est obtenue par des mesures indirectes puisqu'on ne disposait pas encore de thermomètres (ou d'une couverture globale suffisante de thermomètres) jusqu'au milieu du XIX^e siècle. L'estimation indirecte de la température moyenne de la basse atmosphère a été faite à

10. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est un organisme intergouvernemental, ouvert à tous les pays membres de l'ONU. Il « a pour mission d'évaluer, sans parti-pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les risques liés au réchauffement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation. Il n'a pas pour mandat d'entreprendre des travaux de recherche ni de suivre l'évolution des variables climatologiques ou d'autres paramètres pertinents. Ses évaluations sont principalement fondées sur les publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue ». Sur cette définition, dont l'analyse montre combien elle est ambiguë, et pour une analyse critique du fonctionnement du GIEC, voir par exemple Postel-Vinay O., *La comédie du climat*, 263 pp., J.C. Lattès, Paris, 2015.

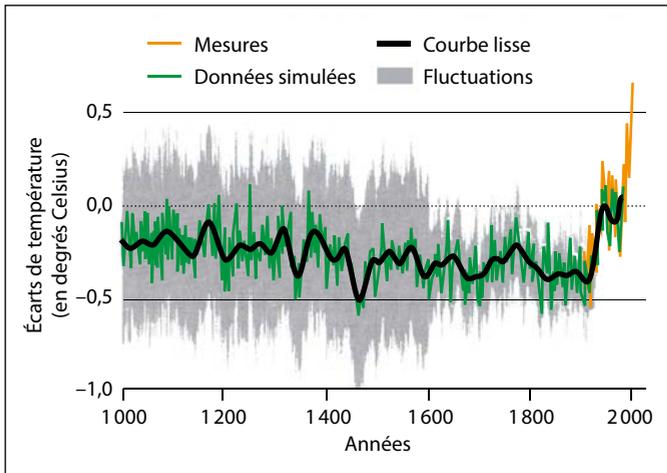


Figure 3

Graphique en « crosse de hockey » de Michael Mann (1998), publié dans le 3^e rapport du GIEC, donnant la variation de la température relative par des moyens directs (courbe orangée) ou dendrochronologiques (cernes d'accroissement des arbres, courbe verte : cette courbe est légèrement décroissante de l'an 1000 à 1900, puis elle croît en deux étapes à partir de 1900, puis à partir de 1950).

partir des cernes (ou anneaux) d'accroissement des arbres.

Les anneaux d'accroissement des arbres sont sensibles à la température (et aussi aux précipitations), et on peut essayer d'étalonner la taille de ces cernes et leurs variations pour en faire des indicateurs de température. La dendrochronologie permet de dater ces variations. C'est ce qui a été réalisé pour obtenir cette courbe, qui semble montrer une période froide de l'an 1000 à la fin du XIX^e siècle (avec un léger refroidissement mais sans grandes variations), suivie d'un réchauffement beaucoup plus rapide au cours des cent dernières années, sans équivalents dans les mille années précédentes, que ce soit en amplitude ou en vitesse.

En fait, cette courbe pose problème, comme l'ont montré

un certain nombre de chercheurs¹¹, par exemple Anders Moberg et ses collègues dans une publication de 2007 dans la revue *Nature*. Moberg et son équipe font remarquer que les arbres sont des organismes vivants qui s'adaptent aux variations de leur environnement. S'ils enregistrent avec leurs cernes les variations rapides de la température et des précipitations d'une année à l'autre, ils n'enregistrent pas bien les variations sur des temps plus longs, tout simplement parce qu'ils s'adaptent. Les arbres sont des filtres « passe-haut », à l'image des

11. Il existe d'autres arguments, notamment mathématiques. La méthode utilisée pour construire une courbe moyenne à travers le nuage des données d'observation est biaisée et engendre presque forcément une courbe en forme de « crosse de hockey ».

filtres électroniques qui ne laissent passer que les hautes fréquences.

Moberg a utilisé de meilleurs marqueurs des variations lentes de la température qui sont les isotopes de l'oxygène, dont les variations sont mesurées dans des carottes sédimentaires réparties dans tous les océans du globe. Il a ainsi reconstitué la courbe de la **Figure 4**. Il a en outre étendu l'étude sur mille ans de plus, jusqu'aux environs de l'an 0. L'amplitude et la forme des variations de température de « haute fréquence », c'est-à-dire les variations rapides sur des temps courts, n'ont pas beaucoup changé par rapport à celles de la courbe de la **Figure 3**. Mais apparaît nettement, sur des temps plus longs, une période froide que connaissent bien les historiens (voir le **Chapitre d'E. Garnier** dans *Chimie et changement climatique*), que l'on appelle le Petit Âge Glaciaire (PAG) et qui s'étend du xiv^e au xix^e siècles, au moins en Europe, probablement dans tout l'hémisphère Nord et, certains le pensent maintenant, à l'échelle globale. Cette diminution de température a été précédée, vers l'an 1000, d'une période chaude appelée

Optimum Climatique Médiéval (OCM), avec avant une période plutôt plus froide. Maintenant, les paléoclimatologues ont des indices de l'existence d'une période chaude au temps des Romains et d'une autre mille ans auparavant.

Il semble donc qu'apparaisse un cycle de mille ans qui ne peut pas être dû aux variations du gaz carbonique : le dégagement accéléré de CO_2 « anthropique » au cours du xx^e siècle n'a bien sûr pas d'équivalent au x^e siècle.

Cela, avec d'autres éléments dont nous reparlerons plus loin, a conduit un certain nombre de chercheurs à étudier le rôle du Soleil, dont tout le monde est d'accord pour dire que depuis des milliards d'années jusqu'au milieu du xx^e siècle il était le principal pilote de l'évolution du climat : ce n'est que pour le dernier demi-siècle que se posent des questions !

3.3. L'évolution du climat au cours des derniers 150 ans

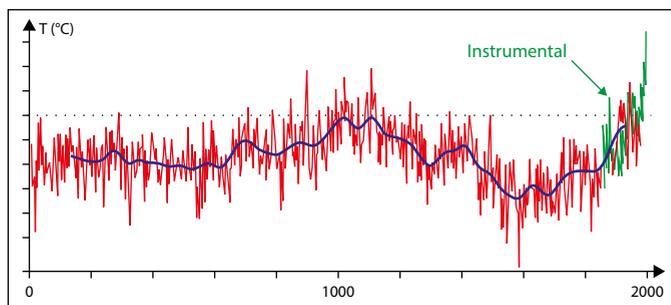
Continuons à « zoomer » sur ces échelles de temps emboîtées et regardons maintenant les 150 dernières années, avec une courbe plus précise de l'évolution de la tempéra-

Figure 4

Évolution de la température relative de l'an 0 à l'an 2000 : les reconstitutions de la température combinent les cernes d'accroissement des arbres avec les isotopes de l'oxygène de carottes sédimentaires réparties dans les océans du globe.

Source : Moberg et coll. (2007).

Nature.



ture, ou plutôt de ses « anomalies », prises par rapport à une certaine référence de la température globale de la basse atmosphère à la surface de la Terre (souvent la moyenne des températures entre 1961 et 1990 ; **Figure 5A**). L'échelle de gauche est en dixièmes de degrés Celsius et les lignes horizontales sont espacées de 0,4 °C. **Une augmentation de 0,7 °C ou 0,8 °C entre 1850 et 2000 apparaît**

sur ce diagramme. C'est le fameux réchauffement climatique.

Si on souhaitait déduire une tendance à partir de cette courbe, celle-ci pourrait avoir l'allure de la courbe rouge de la **Figure 5B** (qui n'est pas ici déterminée mathématiquement mais esquissée à la main). Il serait tentant de l'extrapoler au-delà des années 2000 comme indiqué sur la partie droite de la figure.

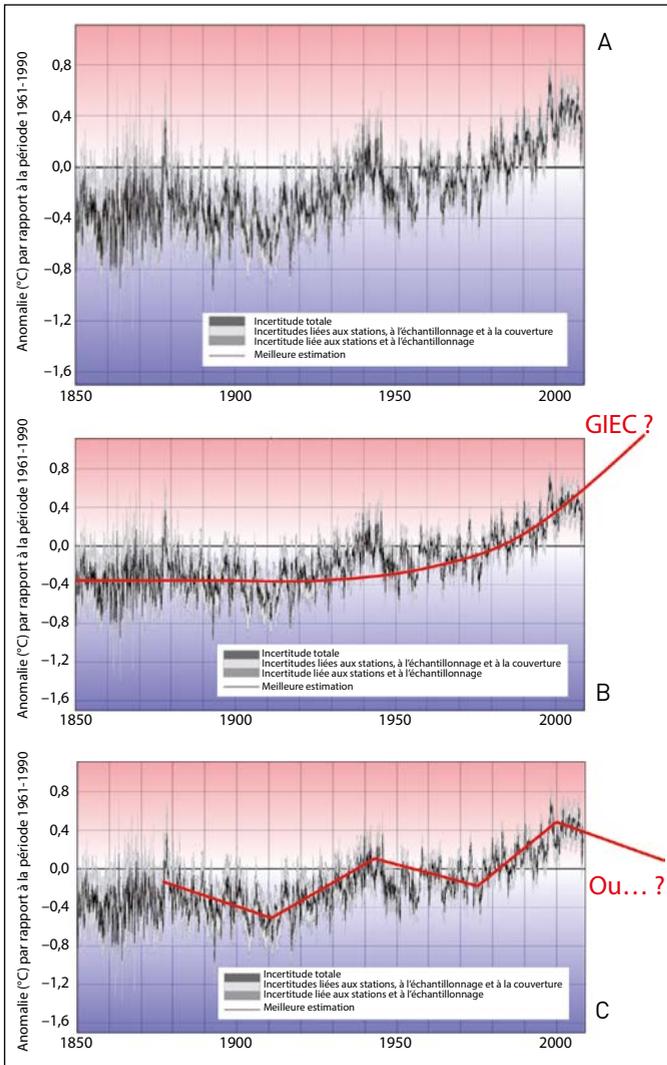


Figure 5

A) Évolution de l'anomalie globale de température de 1850 à 2007 (source CRU, Hadley Research Center). Les moyennes mensuelles sont exprimées par rapport à une référence qui est la moyenne des températures de 1961 à 1990 ; B) une esquisse de la tendance de cette évolution à l'échelle pluridécennale à séculaire, représentée par une courbe monotone croissante, qui rappelle la croissance de la concentration de CO_2 dans l'atmosphère et sa possible extrapolation ; C) une interprétation alternative soulignant une succession de segments de droite (évolution linéaire du climat) séparés par des changements de pente (bifurcations) alternativement positive et négative (ou stable pour la période la plus récente, voir la **Figure 11**).

Mais la détermination de la tendance et son extrapolation pourraient aussi être effectuées d'une façon différente, selon la façon d'analyser les observations (**Figure 5C**). Je fais partie d'un groupe de chercheurs qui pensent que, de façon très significative, cette courbe est faite d'une alternance de segments de droite : la pente moyenne sur 150 ans est certes croissante, mais elle est affectée d'une variation de la pente de segments de 30 ans (sur lesquels je reviendrai parce qu'ils ont à mes yeux une grande importance).

Cette discussion est pour l'instant indépendante du fait que l'homme, qui brûle en quelques siècles des ressources carbonées fossiles accumulées pendant des millions d'années, connaît une situation qui ne pourra pas durer indéfiniment. La source du CO_2 ainsi produit est bien une source « anthropogénique ».

Le diagramme utilisé la plupart du temps pour montrer l'évolution de la teneur en CO_2 dans l'atmosphère est celui du rectangle du haut de la **Figure 6**, dans lequel l'axe des abscisses est représenté au niveau de la valeur de la concentration en gaz carbonique dans l'atmosphère dans les années 1750. Elle part de 280 parties par million (ppm) pour monter à la valeur actuelle de 400 ppm. C'est certes une augmentation importante (40 %). Mais si on montre où est vraiment le départ de l'axe des ordonnées, l'évolution demeure importante mais son effet visuel est relativisé : deux présentations également justes des mêmes observations peuvent véhiculer des messages subliminaux très différents. Il faut aussi se souvenir que 400 ppm (0,04 %) est une concentration très faible qui fait du gaz carbonique un gaz rare dans l'atmosphère, cependant indispensable à la Vie sur Terre.

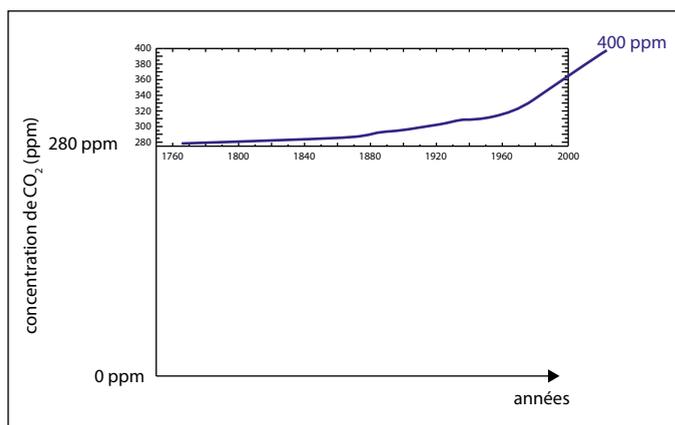


Figure 6

Variation de la concentration en CO_2 dans l'atmosphère. Le message qu'on retient inconsciemment est sans doute assez différent si l'on place l'axe des abscisses à la valeur 280 ppm (comme c'est fait en général) ou 0 ppm (comme je l'ai surajouté ici) de l'axe des ordonnées (concentrations en CO_2).

4 Évolution de l'activité solaire

La concentration en CO_2 a certes augmenté depuis le XVIII^e siècle de plus de 40 % dans l'atmosphère à cause de l'activité humaine (surtout depuis 50 ans). Il est intéressant de regarder comment, pendant cette même période, a varié l'activité du Soleil dont tout le monde est d'accord pour dire qu'auparavant il était le pilote principal du climat.

On a la chance de pouvoir reconstituer, par des moyens divers, l'activité du Soleil dans le passé, et en particulier pour les 400 dernières

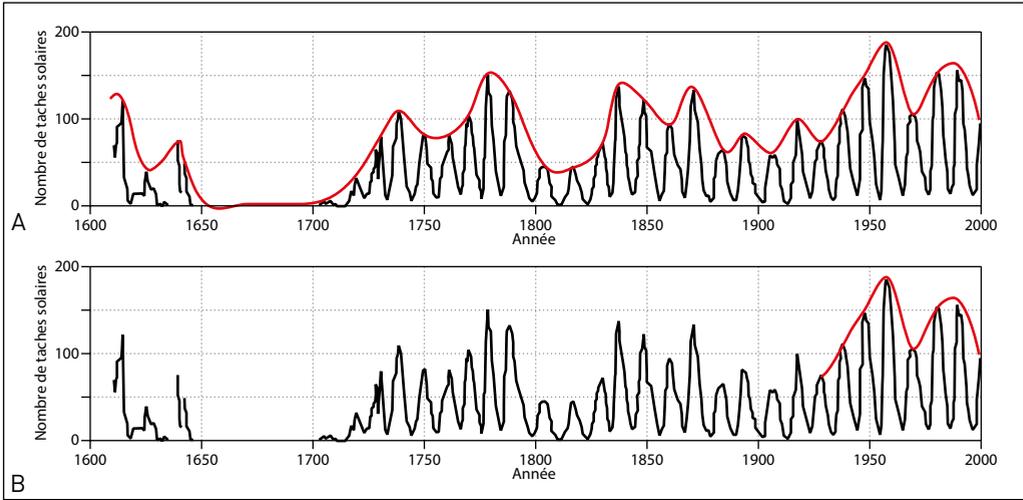


Figure 7

A) Variations de l'activité solaire (caractérisée par le décompte du nombre de taches solaires) depuis 400 ans. L'enveloppe rouge met en évidence des variations pluri-décennales à séculaires (depuis 1700), particulièrement marquées au siècle dernier (enveloppe de 1925 à 2000 ; B) même figure, mettant l'accent sur la variation en forme de M majuscule dissymétrique du xx^e siècle (représentée de manière quantitative plus exacte sur la Figure 8).

années, grâce à l'observation de l'évolution du nombre de taches solaires¹² (Figure 7A). Les maxima de la courbe noire montrent, entre l'an 1600 et l'an 2000, l'existence de cycles de onze ans ; l'enveloppe rouge (dessinée à la main) met en évidence les variations sur le plus long terme.

Durant la deuxième moitié du xvii^e siècle (« Minimum de Maunder »), qui correspond à la période la plus froide du Petit Âge Glaciaire, et durant la période autour de 1800-1830 appelée « minimum de Dalton », qui correspond aussi à une période froide (cf la retraite de Russie), l'activité du Soleil était très réduite : il n'y avait pas ou peu de taches solaires.

Il se trouve que le Soleil a connu ses cycles les plus importants justement au xx^e siècle (Figure 7B). Ceux-ci

sont cependant d'amplitude très variable (courbe noire), avec une enveloppe (en rouge) en forme de M majuscule dissymétrique. Nous sommes en ce moment dans une période de cycle d'activité solaire faible, et certains astrophysiciens spécialistes du Soleil pensent pouvoir, en analysant ces courbes et la physique du Soleil, extrapoler vers une chute qui nous ramènerait d'ici 30 à 60 ans dans un minimum analogue à celui des années 1800, voire un minimum de type « Maunder ».

5 Corrélation entre l'activité solaire et la variabilité des températures au xx^e siècle

Quelques résultats d'études des dix dernières années portant sur le xx^e siècle sont reportés sur les Figures 8 et 9.

Sur la Figure 8, on compare deux courbes, une en bleu qui mesure l'activité solaire (c'est, en plus précis, le « M majuscule » de la Figure 7B), et la courbe en vert, qui me-

12. Tache solaire : région à la surface du Soleil marquée par une température inférieure (donc moins lumineuse) et une intense activité magnétique.

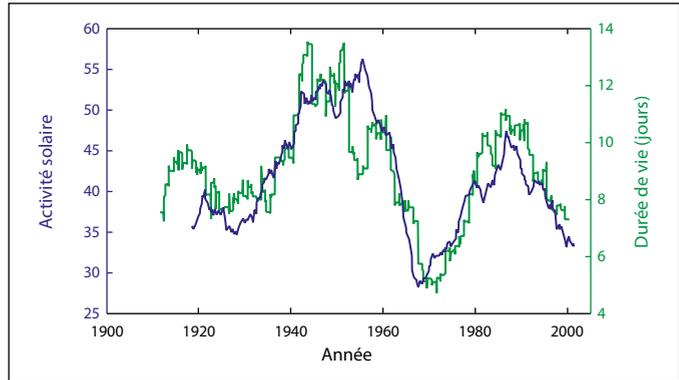


Figure 8

Évolution de l'activité solaire et de la variabilité (ou durée de vie) de la température aux Pays-Bas de 1910 à 2000. Ces deux courbes suivent des variations très proches.

Source : Le Mouël et coll. (2009).

sure la variabilité des températures observées dans les stations météo des Pays-Bas ; la même comparaison a été réalisée pour l'ensemble des stations météo d'Europe. Cette corrélation entre l'activité solaire et la variabilité de la température aux Pays-Bas et en Europe est remarquable, et il est difficile de ne pas y rechercher une forme de causalité. Or, à ma connaissance, il n'existe aucun modèle qui rende compte de ces observations.

Nous avons aussi montré que les cycles du nombre de taches solaires observées sur une quarantaine d'années, représentés en rouge sur la **Figure 9**, corrélient bien avec une composante de la variation de la rotation de la Terre, c'est-à-dire de la longueur du jour. *Comment les minuscules fluctuations de la rotation de la Terre peuvent-elles être liées aux cycles solaires ?* Nous pensons que ces fluctuations résultent d'un changement du moment angulaire de l'en-

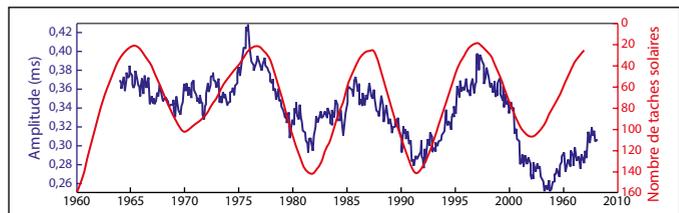


Figure 9

Corrélation entre le nombre de taches solaires (en rouge) et l'amplitude de la raie spectrale de 6 mois de la longueur du jour entre 1964 et 2007. Le nombre de taches solaires est inversé (changement de signe) et décalé d'un an, pour être en phase avec les rayons cosmiques, élément sans doute important du lien physique responsable de la corrélation.

Source : Le Mouël et coll., GRL (2010).

semble des vents zonaux¹³ de l'atmosphère. Il est difficile d'imaginer que le Soleil, dont l'activité corrèle si bien, n'en est pas d'une façon ou d'une autre à la source, mais par un mécanisme dont nous n'avons pas encore l'explication physique. Il existe déjà quelques hypothèses, faisant notamment intervenir les rayons cosmiques, qui corrèlent très bien et de manière indubitablement causale avec les cycles de taches solaires.

6 Sur le bilan radiatif

La **Figure 10** est une figure de base de tous les traités de climatologie, qui résume les différents flux de chaleur de l'atmosphère, ainsi que les contributions au bilan radiatif. La quantité d'énergie qui arrive du Soleil au niveau de la haute atmosphère est en moyenne sur 24 heures, en tenant compte de l'alternance jour/nuit, de 342 W/m^2 . Le 100 %, représenté par la large barre orangée, se répartit de diverses façons. Environ la moitié (47 %) atteint la surface de la Terre qu'elle réchauffe. La Terre renvoie une partie de cette énergie par émission infrarouge, représentée par la large flèche rouge (sur ce dessin, les rayonnements visible et infrarouge ont été séparés). Dans la vision majoritaire, le réchauffement de l'atmosphère terrestre dû à l'effet de serre (abordé dans le **Chapitre de H. Le Treut** dans *Chimie et changement climatique*) résulte de l'effet

représenté par la petite flèche courbe rouge foncé.

Une partie de l'énergie incidente est absorbée et une partie réfléchiée par les nuages. Donc, quand la nébulosité change, la quantité d'énergie solaire renvoyée vers l'atmosphère peut varier beaucoup. Or la répartition et la surface de ces nuages ne sont bien connues de façon quantitative que depuis le début de l'ère satellitaire, soit une trentaine d'années (variations de quelques pourcents). Quelques pourcents du quart de 342 W/m^2 , cela fait un flux équivalent à celui que l'on invoque dans l'effet de serre ($3,7 \text{ W/m}^2$, quand on aura atteint – ce qui n'est pas encore le cas – un doublement de la quantité de gaz carbonique dans l'atmosphère par rapport à la teneur préindustrielle).

Cette variation de la couverture nuageuse n'est pas encore pleinement prise en compte par les modèles, faute d'une bonne compréhension des causes exactes de ces variations. Le GIEC le reconnaît comme un sujet de recherche essentiel et une grande source d'incertitude. Les variations de l'activité solaire se marquent par des variations de la lumière visible mais aussi par des variations plus fortes de la part de cette énergie qui réside dans l'ultra-violet. Le rayonnement ultra-violet influence les couches de la haute atmosphère, l'ionosphère¹⁴, et par là les champs magnétique

13. Les vents circulant le long des parallèles, c'est-à-dire à latitude constante.

14. Partie de l'atmosphère ionisée par les radiations solaires (notamment UV) qui s'étire de 60 à 800 km.

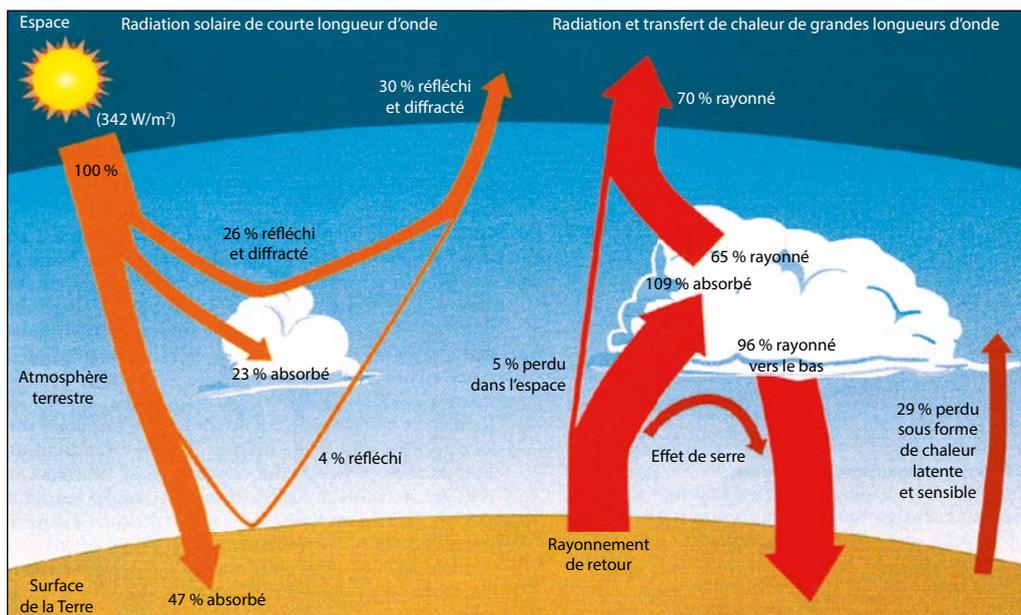


Figure 10

Les flux de chaleur dans l'atmosphère et leur contribution au bilan radiatif

et électrique qui y règnent. Ces derniers ont une influence sur la charge électrique des nuages et sur les processus de leur nucléation. On a ainsi, au moins de manière qualitative, une chaîne physique causale qui relie les variations à long terme de l'activité solaire à celle des nuages, composante majeure du système climatique. Ces processus ne sont généralement pas exprimés dans les modèles numériques actuels.

7 La modélisation du changement climatique : les problèmes encore non résolus

7.1. Un plateau dans l'anomalie des températures depuis au moins 15 ans

Depuis la fin des années 1990, la température moyenne a

atteint un plateau (**Figure 11**), constaté dans tous les rapports du GIEC et reconnu comme très difficile à expliquer.

De nombreuses équipes mènent des recherches pour voir si les modèles existants sont capables de rendre compte de ce plateau. Je considère, avec beaucoup d'autres, que ce plateau n'a pas été pour l'instant expliqué¹⁵ ; la **Figure 12** illustre ce point de vue. Elle montre, avec des couleurs différentes, les prévisions des températures de la basse atmosphère et de la couverture continentale issues des modèles présentés dans les rapports du GIEC depuis le premier rapport du début des années 1990 jusqu'à 2015. À droite figurent les prédictions pour 2015 avec leurs

15. Une trentaine d'hypothèses, mutuellement incompatibles, ont récemment été suggérées...

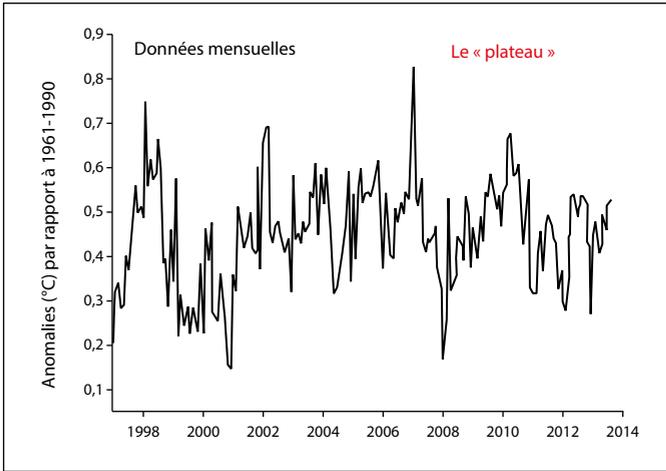


Figure 11

Évolution de l'anomalie de température entre 1997 et 2014 (par rapport à la température moyenne entre 1961 et 1990). 1998 correspond à un grand phénomène El Niño, qui est météorologique et non climatique. 2015, non représentée ici, est une autre année de grand épisode El Niño.

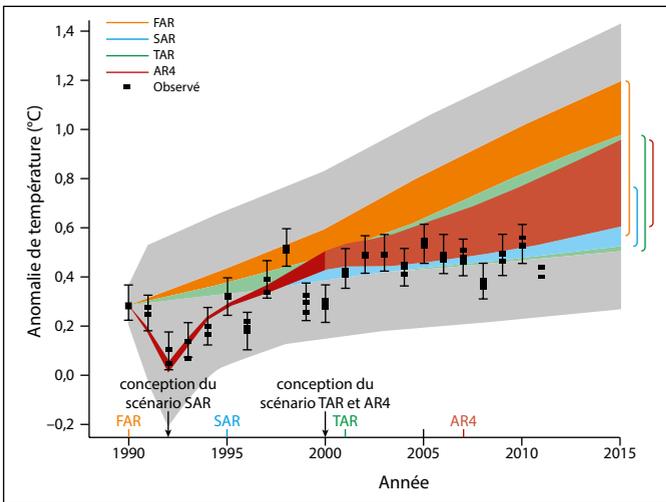


Figure 12

Évolution de la température de la basse atmosphère et de la couverture continentale : comparaison des données observées avec celles prévues par les différents rapports du GIEC. FAR = first assessment report ; SAR = second assessment report ; TAR = third assessment report ; AR4 = assessment report number 4.

marges d'incertitude. En noir, avec les incertitudes, sont reportées les températures observées ; on y voit apparaître le plateau depuis la fin des années 1990 (1998 est une année de fort El Niño ; 2015 aussi). Plus le temps passe, plus ce plateau infirme un nombre considérable de modèles qui « sur-prédisent » les observations.

L'évolution des températures moyennes de la tropo-

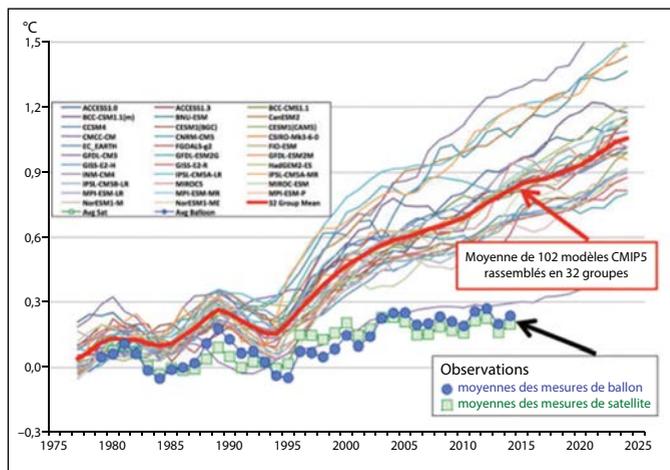
sphère¹⁶, déduite des mesures de ballons (points bleus sur la **Figure 13**) et des mesures de

16. Troposphère : première couche de l'atmosphère en partant de la surface du sol, où se produisent les phénomènes météorologiques (nuages, pluies, etc.) et les mouvements atmosphériques horizontaux et verticaux (convection thermique, vents). Le sommet de cette couche de l'atmosphère varie avec la saison et la latitude, entre un maximum de 18 km à l'équateur et un minimum de 8 km aux pôles.

Figure 13

Évolution de l'anomalie de température dans la troposphère moyenne entre 1975 et 2025 par des mesures de ballons et par des mesures de satellites. Comparaison entre les modèles et les observations. Toutes les courbes (moyennes sur cinq ans) partent de zéro en 1979.

Source : J.R. Christy, Univ. Alabama.



satellite (points verts sur la *Figure 13*) fait également apparaître le plateau. Ce n'est pas le cas des courbes obtenues à partir de nombreux modèles qui ont été inter-comparés et dont la moyenne figure en rouge.

7.2. Le changement du niveau des mers

Grâce aux satellites, on sait que depuis une vingtaine d'années, l'élévation du niveau de la mer est d'environ 3 mm par an, ce qui voudrait dire 30 cm si l'on pouvait extrapoler sur un siècle (*Figure 14A*, segment rouge). Grâce aux marégraphes¹⁷, on sait que le niveau moyen global des mers s'est élevé de 20 cm au xx^e siècle (*Figure 14A*), soit 2 mm par an en moyenne (courbe bleue, *Figure 14B*).

Cette accélération de 2 à 3 mm par an depuis les années 80-

90 est-elle significative (voir aussi le *Chapitre d'A. Cazenave* dans *Chimie et changement climatique*) ? Il me semble que, l'évolution du climat ne se voyant qu'à long terme (un point moyen nécessite trente ans d'observations), une évolution sur vingt ans ne suffit pas pour déterminer une tendance. En effet, si l'on prend des segments de vingt ans à des endroits divers de la courbe de la *Figure 14A*, on peut obtenir des pentes sensiblement inférieures ou supérieures à 2 mm par an, qui peuvent être interprétées comme autant de ralentissements ou d'accélération, mais qui sont de trop courte durée pour être considérées comme ayant une signification « climatique ».

En fait, il me semble qu'on ne puisse pas encore démontrer que les valeurs observées soient sorties de cette variabilité naturelle et que si elles le sont, cette augmentation est une augmentation modeste. La Terre a connu 20 cm d'augmentation du niveau des mers au xx^e siècle. Est-ce que

17. Marégraphe : instrument permettant d'évaluer les variations du niveau moyen de la mer à un endroit donné sur une durée déterminée.

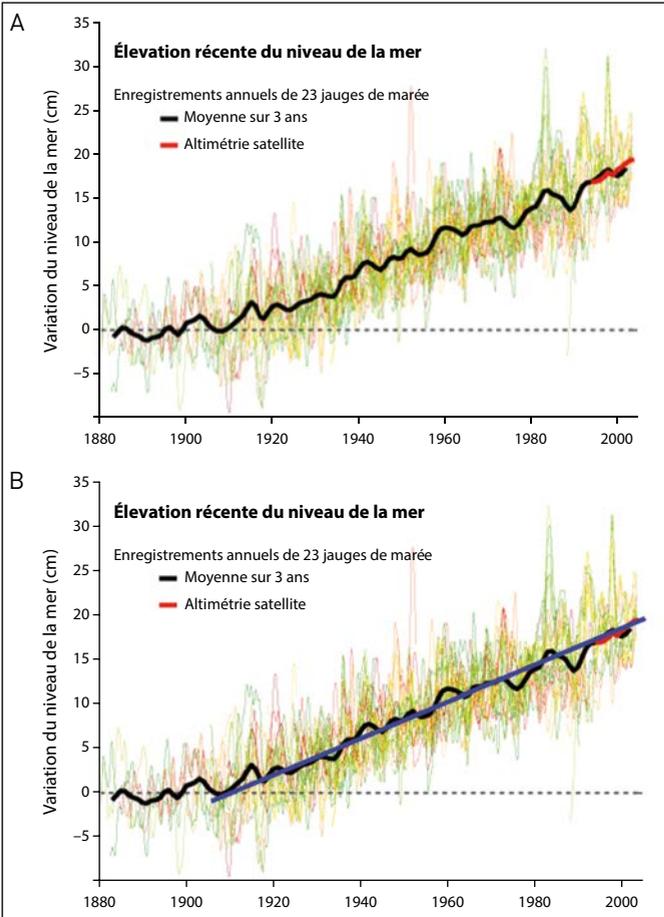


Figure 14

Variation du niveau de la mer depuis 1880. Courbe noire : moyenne sur trois ans obtenue à partir des mesures marégraphiques ; courbe rouge : mesures satellites ; courbe bleue (B) : tendance observée au xx^e siècle.

30 cm ou 40 cm au XXI^e siècle seraient un problème plus difficile à résoudre ? Peut-être un peu, mais pour des raisons de démographie et d'économie. Et des progrès raisonnables devraient permettre d'y faire face avec des réponses techniques appropriées.

8 Les difficultés des prévisions climatiques

Les difficultés des prévisions climatiques peuvent être illustrées par cette citation

d'un des principaux protagonistes du GIEC, disparu en 2010, Stéphane Schneider :

« L'importance dramatique des changements climatiques pour l'avenir du monde a été dangereusement sous-estimée par beaucoup, souvent parce que la technologie moderne nous a bercés dans l'idée que nous avons conquis la nature, mais ce livre bien écrit souligne dans un langage clair que la menace climatique pourrait être aussi terrifiante que tout ce à quoi nous pourrions être confrontés et que des actions massives et mondiales pour se préserver

de cette menace doivent être envisagées sans délai ».

Cette citation est pourtant issue de la quatrième de couverture d'un livre de 1976 consacré à démontrer que nous allons vers le froid et que nous devons être terrifiés par la perspective d'un nouvel âge glaciaire ! Notons, en songeant aux cycles de Milankovic et aux quatre glaciations les plus récentes (voir la **Figure 2**), qu'une prochaine glaciation semble en effet inévitable, mais à l'échelle des prochains milliers d'années.

De même, John Holdren, conseiller scientifique du président américain Barack Obama, a soutenu dans les années 1970 la venue imminente d'un nouvel âge glaciaire, alors que dans les années 2010 il nous alerte sur la « *perturbation du climat global* » due aux terribles réchauffements climatiques que nous devrions attendre.

Risquons avec un sourire une interprétation semi-psychologique de ces déclarations, mais peut-être pas sans fondement : les fluctuations de température pourraient être bien représentées par ce qui ressemble, pour les physiciens-chimistes, à la réponse non linéaire d'un système d'oscillateurs couplés. Il a été noté, par exemple par A. Tsonis et ses collaborateurs (GRL, 2007), que le fonctionnement des océans ressemble à un système d'oscillateurs non linéaires couplés. Cela est bien compatible avec l'évolution des anomalies globales de la température des océans (voir les **Figures 5C** et **15A**), où l'on observe, comme nous

l'avons vu, des tendances relativement uniformes sur des périodes de trente ans pendant lesquelles successivement la température croît ou décroît, séparées par des basculements de pente relativement rapides.

La **Figure 15A** montre qu'après trente ans de décroissance de la température entre 1940 et 1970, Schneider, Holdren et d'autres pouvaient en effet être tentés d'extrapoler (ligne rouge) et s'inquiéter d'un retour vers un âge glaciaire.

Comme après trente ans de réchauffement, on s'inquiète maintenant de la poursuite de ce réchauffement et l'on est tenté d'extrapoler selon la ligne rouge de la **Figure 15B**.

Mais si on croit à la réalité de cette pseudo-périodicité de trente ans (en fait $2 \times 30 = 60$), qui apparaît sur la **Figure 15C**, on pourrait dire que les quinze ans de plateau que nous venons de vivre ont toutes les chances de se continuer par un plateau (ligne rouge), ce qui ne veut pas dire que la tendance linéaire séculaire qui est en arrière-plan n'existe pas. Mais qu'elle soit due en partie au CO_2 ou au Soleil est un sujet de recherche ouvert : personne ne sait vraiment bien quelle est la part de chacune de ces deux sources, et il faudrait démontrer l'une avant d'exclure l'autre.

On peut remarquer que le réchauffement entre 1910 et 1940, quand il y avait pourtant une faible augmentation du CO_2 , est pratiquement de la même valeur, de la même durée, avec les mêmes caractéristiques que celui qui

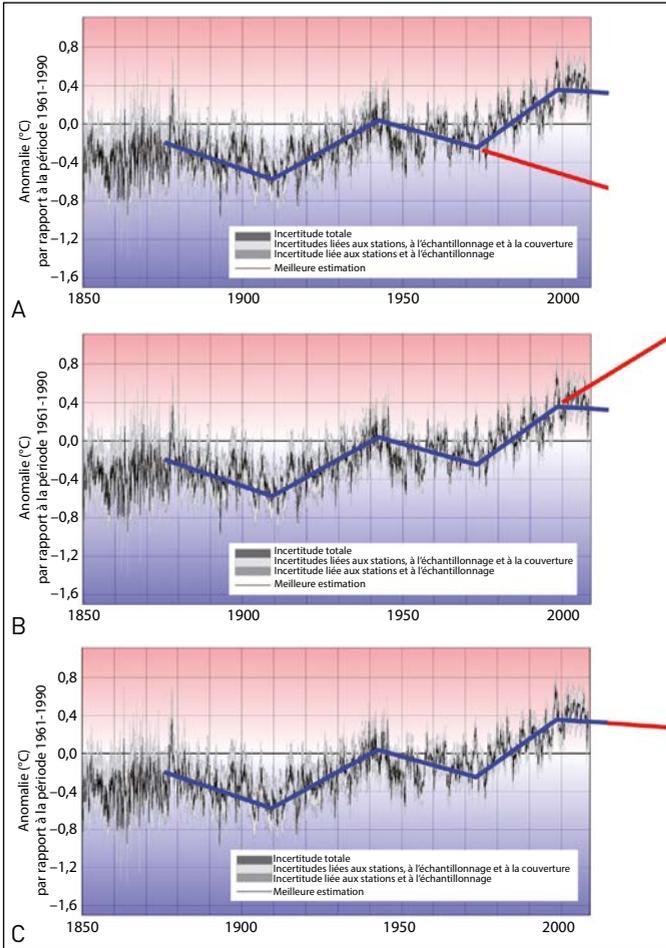


Figure 15

Évolution de l'anomalie globale de température de 1850 à 2007 et « prédictions » (?) pour les décennies à venir. Ce qu'on pouvait imaginer par simple prolongation de la tendance des décennies précédentes :

- A) dans les années 1970 ;
- B) dans les années 1990 ;
- C) en 2015 ?

La courbe bleue est notre proposition de ce qui pourrait être la signature d'un modèle d'oscillateurs couplés.

semble avoir effrayé tant de monde entre 1970 et l'an 2000, et qui est à la base des conclusions actuelles du GIEC. Cela ne plaide pas en faveur d'une relation entre évolution de la teneur en CO₂ de l'atmosphère et sa température.

Les changements de pente des courbes d'évolution des températures moyennes de surface des océans corrélient en revanche avec les changements de signe ou de pente des grands indicateurs de l'état de l'Océan Pacifique et de l'Océan Atlantique

(Figure 16) : ceci laisse penser que c'est bien l'océan qui, par le biais d'un mécanisme d'oscillateurs couplés, est un pilote majeur de l'atmosphère.

Cependant, on y voit mal la corrélation avec le gaz carbonique. Est-ce que l'océan seul est un système chaotique qui produit ces oscillations ? Ou est-ce qu'elles sont pilotées ou déclenchées, ou même contrôlées par le Soleil par exemple ? Nous ne savons pas encore répondre à ces deux questions (voir Tsonis et coll.).

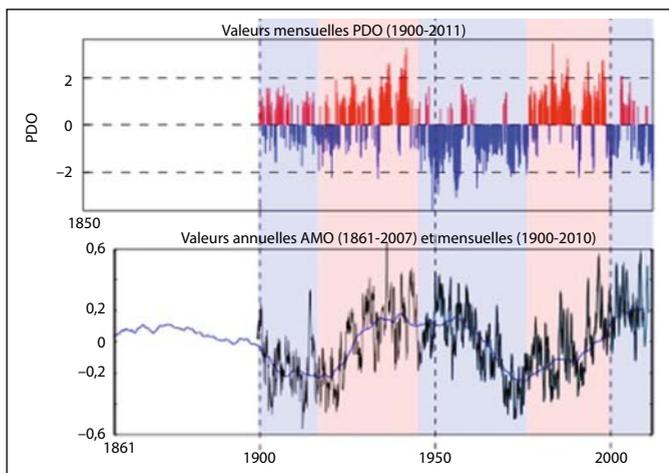


Figure 16

Variations des caractéristiques de l'océan Pacifique (PDO = Pacific decadal oscillation = oscillation décennale du Pacifique) et de l'océan Atlantique (AMO = Atlantic multidecadal oscillation = oscillation multi-décennale de l'Atlantique) entre 1900 et 2011. Les bandes à l'arrière-plan alternativement bleues et roses pâles correspondent aux segments de pente respectivement croissante et décroissante de la température sur la Figure 15. Elles montrent la bonne corrélation entre changements de pente de la température, de signe de PDO et de pente d'AMO.

Source : Courtillot et coll. (2010).

Un débat toujours ouvert

Un réchauffement global est effectivement observé depuis 150 ans, mais :

- il est faible (environ un dixième) comparé au réchauffement (bénéfique) qui a fait suite à la dernière des glaciations ; il ne sort pas de la variabilité naturelle observée depuis des siècles, pour autant qu'on sache la reconstituer correctement à l'échelle globale ;
- il est irrégulier et dans l'espace et dans le temps ;
- il n'est pas sans précédent, ni en amplitude, ni en vitesse, depuis deux millénaires, contrairement à ce que pensent beaucoup de gens.

Les sources de ce réchauffement sont complexes, multiples, certaines encore mal

comprises et non prises en compte dans les modèles (physique des nuages, rôle des rayons cosmiques, des UV solaires,...).

Il existe des indices forts, basés sur des observations non encore prises en compte dans les modèles, de l'influence de la variation de l'activité solaire sur le climat sur des échelles de temps allant de quelques décennies à des millénaires, et ce, jusqu'à aujourd'hui.

Les mécanismes physiques à l'origine de ces observations ne sont pas encore bien compris. Ils pourraient impliquer, pour certains chercheurs, les rayons cosmiques et les fluctuations dues aux champs magnétiques du Soleil ou de la Terre, ou encore les courants ionosphériques et leur action sur la couverture nuageuse.

La compréhension du changement climatique est un sujet de recherche encore ouvert.

On peut rappeler un beau texte de Marcel Conche sur Montaigne : « *Avec les sceptiques, il convient de suspendre son jugement au sujet des choses elles-mêmes et de renoncer à exprimer l'être de quoi que ce soit. Avec les dogmatiques, il faut s'essayer à juger et à vivre de la vie de l'intelligence. On ne sera pas sceptique, car on se formera une opinion et on n'hésitera pas à la donner ; on ne sera pas dogmatique, car on ne prétendra pas exprimer la vérité, mais seulement ce qui, pour nous, à un moment donné, en a l'apparence* ». Un scientifique peut-il faire autre chose qu'adhérer à ces définitions et se situer à égale distance (loin) du scepticisme pur et dur et du dogmatisme ? C'est à dire être pour l'instant « climato-agnostique ».

Tout chercheur doit être ouvert au doute. C'est ce que nous dit Richard Feynman, ce grand physicien, prix Nobel en 1965, qui a écrit des livres remarquables de réflexion sur la science : « *Nous avons trouvé extrêmement important que, de façon à progresser, nous devons reconnaître*

notre ignorance et laisser la place au doute. Notre liberté de douter est née d'un combat contre l'autorité dans les jours anciens de la science. Ça a été un combat profond et difficile, permettez-nous de questionner et de douter de ne pas être sûr. Je pense qu'il est important que nous n'oublions pas ce combat et ce que nous avons à perdre si nous l'oublions »

Il y a du travail pour tout le monde, notamment pour tous les chercheurs, et il y en a beaucoup pour les chimistes, aussi bien dans le domaine du climat que dans le domaine de l'énergie, comme le montrent les divers chapitres de cet ouvrage. Il y a quasiment unanimité pour dire que le problème de l'énergie est un problème essentiel. Il est dû à la démographie. Il y a bien d'autres problèmes à résoudre comme la recherche de l'eau potable, des ressources naturelles, le traitement des déchets, la pollution : ce sont les grands problèmes écologiques, pour l'essentiel sans rapport avec le changement climatique mais qui reçoivent étonnamment beaucoup moins d'attention que lui.

Mettre, comme l'a fait l'Environmental Protection Agency américaine, le CO₂ dans la catégorie des polluants n'est pas sérieux. Sans CO₂, la vie n'existe pas, la photosynthèse n'existe pas. La culture scientifique est une chose importante : elle devrait nous préserver de certaines affirmations hâtives. Il y a besoin, dans ce domaine, comme dans d'autres, de recherche, d'innovation, dans un esprit positif, et donc de débats ouverts et tolérants, loin de tout dogmatisme. En sommes nous préservés ? L'alarmisme exagéré dans lequel nous vivons actuellement est en fait démobilisateur.

Fluctuations climatiques extrêmes

et sociétés au cours du dernier millénaire

Emmanuel Garnier est membre senior de l'Institut Universitaire de France, Directeur de Recherche au CNRS et historien du climat et des risques à l'UMR LIENSs¹ à l'Université de la Rochelle.

Les historiens ont-ils une légitimité dans le débat sur le changement climatique et les fluctuations climatiques ? C'est ce que je souhaiterais démontrer dans cette contribution.

Contrairement aux auteurs des autres chapitres de cet ouvrage *Chimie et changement climatique* (EDP Sciences, 2016), l'historien dispose de très peu de données numériques et instrumentales. De facto, nous étudions la signature sociale qui nous permet de reconstruire les climats d'antan, c'est-à-dire la perception du risque ou l'action même que peut entreprendre une société confrontée au cours des siècles à une fluctuation climatique, et plus

encore à ce qu'on appelle un « extrême climatique »².

1 Les traces du climat dans les archives des hommes

Chaque génération, chaque période a connu, ou en tout cas a eu le sentiment de vivre, un changement climatique : c'est un facteur permanent retrouvé dans toutes les archives.

Quelques mots-clés sont généralement cités dont les plus classiques sont les notions de « dérangement du temps », d'« inversion des saisons », de « monstruosité du temps », etc., mais il y en a bien d'autres selon le pays, la langue, etc.

1. LIENSs (L'Environnement et les Sociétés). Site : <http://lienss.univ-larochelle.fr>

2. Garnier E., *Les dérangements du temps, 500 ans de chaud et froids en Europe*, Paris, Plon, 2010, 244p.

Cette réalité est illustrée par cette citation tirée du journal intime d'un bourgeois toulousain qui a le sentiment, dans les années 1760, de vivre un changement climatique au vu des inondations à répétition qui ravagent une partie de la ville : « *Les sécheresses et les débordements incessants qui s'expliquent par des saisons depuis longtemps confondues ainsi que toutes les autres monstruosités [extrêmes] de toute espèce multipliées à l'infini* » [témoignage du bourgeois toulousain Pierre Barthès dans les années 1760. Garnier E., *Les Dérangements du temps*].

Les archives (Figure 1) reflètent ce sentiment général et sont ainsi les témoins des variations climatiques. En 1670, la météorologie faisait dire à Madame De Sévigné³, confrontée aux difficultés d'écoulement de ses moissons abondantes sur le marché : « *tout crève ici de blé et [...] je crie famine sur un tas de blé* »⁴.

Les historiens, quant à eux, ne « crèvent » pas de faim mais prospèrent sur un tas d'archives : des dizaines, des centaines de mètres linéaires d'archives s'offrent à eux à peu près partout dans le monde.

Cette abondance de documentation traduit l'extrême sensibilité des sociétés anciennes à « la chose climatique ».



Figure 1

Les archives sont des témoins des changements climatiques au cours du temps.

Source : E. Garnier

1.1. Les archives phénologiques

La phénologie⁵ permet aux historiens de travailler avec les climatologues, en repérant par exemple dans les archives les dates de récolte. Un premier type d'archives, abondamment exploité par Emmanuel Le Roy Ladurie, correspond aux bans de vendanges (Figure 2A). Il existe bien d'autres pistes documentaires, comme les mentions de blés nouveaux (Figure 2B), ou encore les dates des récoltes d'olives pour les zones méditerranéennes. Le travail de l'historien consiste alors à relever ces données et leurs dates. Classiquement, les climatologues considèrent qu'une date tardive est le produit d'un climat plutôt froid, alors d'une date précoce est synonyme de climat chaud et relativement sec.

En fait, l'analyse est beaucoup plus compliquée, et c'est à ce niveau qu'intervient l'historien en tant qu'acteur, au moins en partie légitime, dans cette reconstruction des climats, car il y a souvent une surévaluation des facteurs météorologiques.

Dans le cas des vendanges, par exemple, nos collègues climatologues ont reconstruit depuis des décennies des moyennes de température pour les périodes avril-

3. Marie de Rabutin-Chantal, marquise de Sévigné (1626-1696), était une épistolaire française connue pour sa correspondance avec sa fille qui fournit un témoignage sur la société de son époque et la cour de Louis XIV.

4. Gailly G., *Madame de Sévigné. Lettres*, Paris, Bibliothèque de la Pléiade, I, p. 613, 16 octobre 1673.

5. La phénologie des êtres vivants est l'étude de l'apparition d'événements périodiques de leur vie qui est déterminée par les variations saisonnières du climat. La floraison des plantes, la coloration des feuilles à l'automne, l'arrivée des oiseaux migrateurs sont des phénomènes phénologiques.

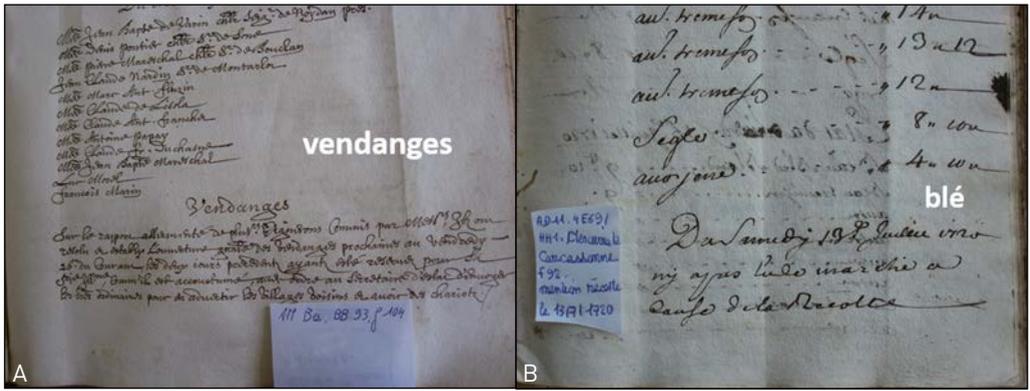


Figure 2

A) Archive phénologique sur les dates de bans de vendanges permettant d'évaluer le climat au moment des récoltes ; B) archives phénologiques sur les récoltes du blé, autre piste pour reconstruire le climat de l'époque.

Sources : Archives municipales de Besançon, BB 93 ; Archives départementales de l'Aude 4 E 69, cliché : E. Garnier.

juin-juillet. On considère que la vigne ne connaît plus d'évolution à compter de la fin juin-début juillet. Or, quand on se plonge dans les archives sur les dates de « bans de vendanges », et quand on les recoupe avec d'autres types d'archives, on constate qu'une partie de ces dates était en fait déterminée par des facteurs anthropiques et en aucun cas météorologiques.

Parmi ces facteurs qui pouvaient influencer sur la prise de décision d'une date de vendange, il y avait :

- les guerres, très importantes, notamment dans l'Europe moyenne ;
- les épidémies : elles vont de pair avec les guerres, le soldat étant un vecteur notamment de la peste ;
- dans certains cas, ce qui échappe totalement à nos collègues des sciences exactes, ce sont les changements de goût et les évolutions culturelles. En effet, au XVIII^e siècle, l'expansion urbaine est générale en Europe, la bourgeoisie urbaine prend de plus en plus d'ampleur, et cette bourgeoisie exige désormais des vins

plus matures qui conduisent forcément à un retard des dates de bans de vendanges.

Ces paramètres, purement anthropiques et culturels, sont très rarement pris en compte par les climatologues dans les études de séries de données phénologiques, alors que souvent, 30 % des dates relevées sont d'origines anthropiques, et non climatiques.

1.2. Les archives religieuses

Les historiens sont de fervents « pratiquants » des archives religieuses. Elles sont très importantes ; toutes les religions produisent de l'archive climatique, en particulier les religions chrétiennes, mais on retrouve des données similaires dans les chroniques musulmanes, en Asie, etc. Pour ma part et celle de mes étudiants, nous travaillons surtout sur des archives produites par les Églises chrétiennes.

1.2.1. Les processions

On processionnait beaucoup, et pour de multiples raisons.

Par exemple, à l'église Sainte Geneviève de Paris, les processions pour cause météorologique représentent 43 % des processions qui ont eu lieu entre 1500 et 1800 (*Figure 3*).

La *Figure 4* montre un très bel exemple de « procession climatique ». Au cours de l'an-

née 1694, l'Europe affronte une sécheresse généralisée contre laquelle on organise une procession globale. En effet, différents stades de processions étaient pratiqués selon la gravité de l'évènement extrême. Ici, c'est une procession *pro pluvia* pour laquelle

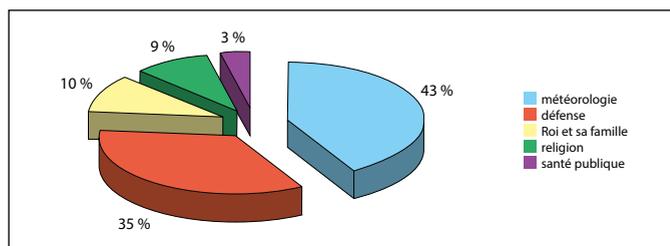


Figure 3

Les processions météorologiques à Sainte Geneviève à Paris (1500-1800) témoignent des périodes de sécheresse extrême.

Source : Garnier E., *Les dérangements du temps, 500 ans de chaud et froids en Europe*, Paris, Plon, 2010, 244p.

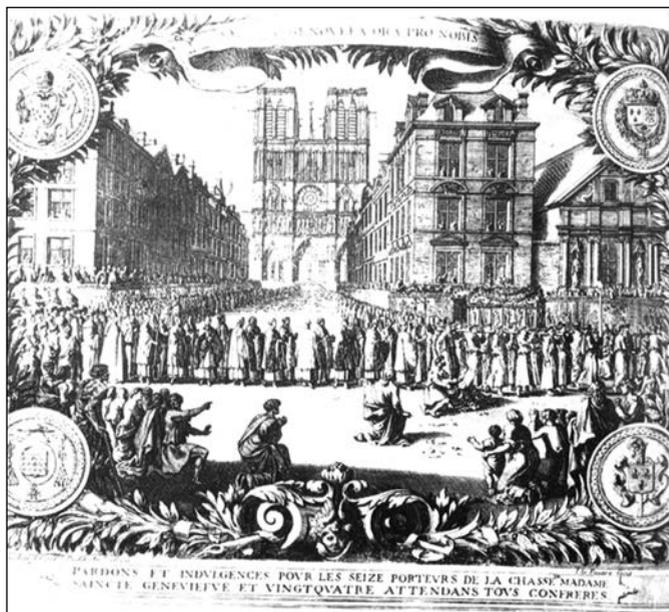


Figure 4

Gravure représentant une procession *pro pluvia* à Paris à l'occasion de la grande sécheresse européenne de 1694.

Source : BNF, 62 C 2000L, cliché E. Garnier.

on a réuni devant Notre Dame de Paris les reliques de Sainte Geneviève et de Saint Marcel ; c'est vraiment le stade ultime sur le plan liturgique qui indique la gravité de l'évènement extrême.

Ces processions sont de très bons indicateurs pour identifier la gravité des évènements extrêmes : la première procession, plus petite, a lieu à titre presque préventif ; quand on commence à percevoir la menace, le risque, et si la crise s'éternise, des processions de grande ampleur du type de celle de 1694 sont alors organisées.

1.2.2. Les registres paroissiaux

Quand la chronologie des évènements climatiques a été identifiée, les registres paroissiaux permettent de mesurer l'impact démographique de ces extrêmes et de ces fluctuations en termes de mortalité. À Cambridge, les registres anglicans (Figure 5) sont beaucoup plus précocement tenus que les registres

français de cette époque. On y trouve le sexe, le nom, la personne, l'âge, etc., et on peut ainsi réaliser des approches démographiques extrêmement fines liées à ces extrêmes climatiques, et cela dès le XVI^e siècle.

1.2.3. Les ex-voto

Les ex-voto (Figure 6) offrent une approche visuelle du climat de l'époque et démontrent une fois de plus l'extrême sensibilité des sociétés anciennes aux extrêmes. Considérant qu'il était impératif d'en conserver la mémoire, les fidèles peignaient ou faisaient peindre l'évènement qu'ils étaient parvenus à surmonter. Ces ex-voto se retrouvent dans tous les pays de tradition catholique, c'est-à-dire une bonne partie de l'Europe, de l'Amérique du Sud et parfois même de l'Afrique christianisée par les colonisateurs. J'ai personnellement retrouvé au Sénégal des ex-voto du XIX^e siècle dans l'église de l'île de Gorée.



Figure 5

Les registres paroissiaux permettent de réaliser des approches démographiques fines liées aux extrêmes climatiques (ici : registre paroissial de la paroisse Saint-Michel de Cambridge, 1783).

Source : Cambridgeshire Archives, P 32/1/4, cliché : E. Garnier.



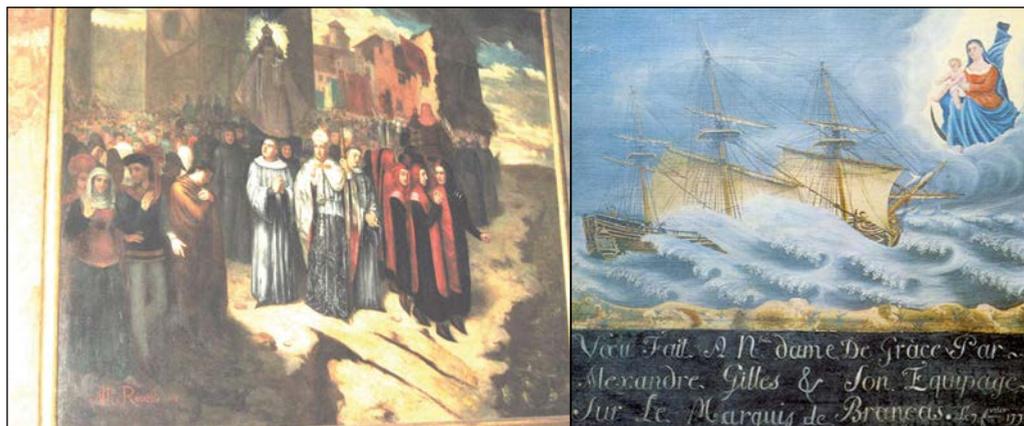


Figure 6

Les ex-voto permettaient aux populations de se souvenir qu'elles ont survécu à un extrême.
 A) Ex-voto relatant une procession contre l'inondation à Toulouse (XIV^e siècle. Église N.-D. de la Daurade) ;
 B) ex-voto marin de tempête N-D Honfleur (XVIII^e siècle).

Source : E. Garnier.

1.3. Les archives administratives

1.3.1. Les archives municipales

Sans la bureaucratie, les historiens perdraient environ 50 % de leur documentation ! Cette bureaucratie est

en fait généralement liée au processus de construction des États, à compter des XIV^e-XV^e siècles. La **Figure 7** présente un exemple d'archive municipale, une mine d'or pour le chercheur à l'échelle de l'Europe. Ce document

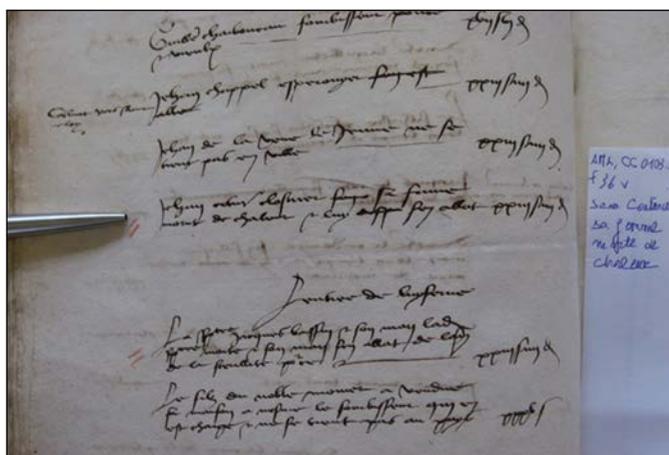


Figure 7

Les comptes des deniers (Arc. Mun. Lyon, CC 0103) ont permis de mettre en évidence l'augmentation du nombre de décès liée à la vague de chaleur de l'été 1481 à Lyon.

Source : E. Garnier.

comptable, appelé « compte de deniers », contient les traces d'une sécheresse et d'une vague de chaleur qui sévirent à la fin du xv^e siècle dans le lyonnais ainsi qu'en pays genevois. Le document recense les contribuables qui décèdent. Il explique que Jean Couturier a perdu sa femme « morte de chaleur ». Au total, plusieurs dizaines de décès liés à cette vague de chaleur sont comptabilisés.

1.3.2. Les archives des compagnies privées

La **Figure 8** correspond à un rapport technique produit par un organisme privé en charge de la région marécageuse des Fens, au nord-est

de Cambridge. Il évoque une sécheresse en 1785. D'ampleur européenne, elle eut des conséquences socio-économiques dramatiques. En France, le Marais Poitevin fut en partie asséché, ce qui provoqua une surmortalité du bétail.

1.3.3. Les archives militaires

Parmi les archives administratives, il convient de citer les fonds militaires car les armées, pour des raisons stratégiques évidentes, se préoccupaient de météorologie. Chronologiquement, ces observations débutent dans les archives avec les livres de bord des capitaines de la *Royal Navy* anglaise (**Figure 9**), puis un peu plus tard, ceux des

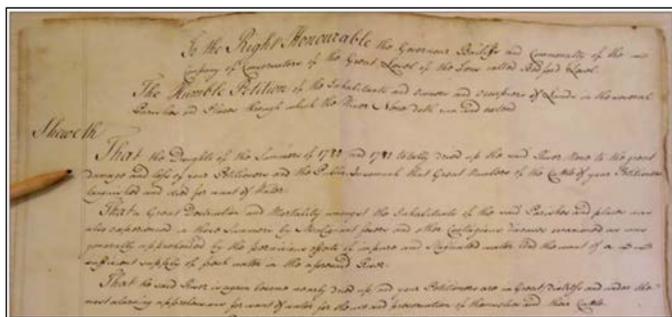


Figure 8

Pétition des habitants et propriétaires des Fens (Great Level of the Fens) à propos des effets de la sécheresse de 1785.

Source : Cambridgeshire Archives S/B/SP 742, cliché E. Garnier.

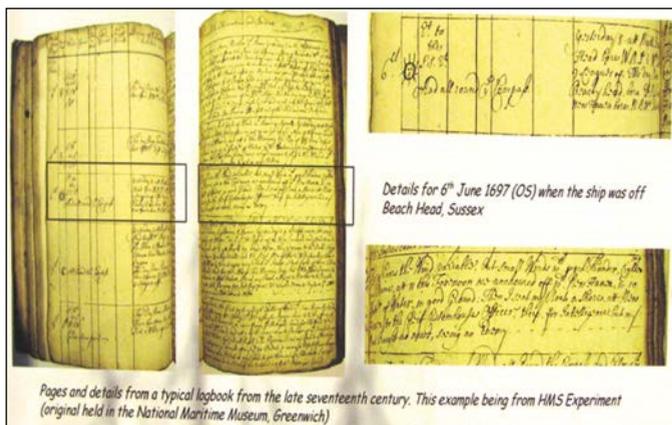


Figure 9

Les livres de bord de la Marine anglaise donnent des informations précieuses sur la météorologie (ici : extrait d'un logbook HMS Experiment, fin XVIII^e).

Source : The National Archives, BA 456.

Pages and details from a typical logbook from the late seventeenth century. This example being from HMS Experiment (original held in the National Maritime Museum, Greenwich)

français qui sont un peu en retard en termes de réforme administrative. L'ensemble procure de précieuses informations sur l'évolution des climats océaniques.

1.4. Les données instrumentales

À compter de la seconde moitié du XVII^e siècle, la science progresse lentement mais sûrement avec l'arrivée d'une nouvelle génération de scientifiques. Le philosophe John Lock illustre l'engouement des scientifiques pour la chose météorologique, lui qui effectua des registres

météorologiques méconnus à Oxford dans les années 1660 (Figure 10). Dans cet extrait, il mentionne un « soleil rouge inhabituel » qui, en réalité, correspond au fameux *Great Fire* (grand incendie) de Londres en 1666, conséquence d'une sécheresse qui sévissait depuis les années 1665 dans le centre de l'Angleterre. Ainsi, dès le milieu du XVII^e siècle, l'historien peut recouper la réalité climatique et les observations instrumentales.

Enfin, au XVII^e siècle, Louis XIV impose ses ambitions absolutistes au monde des sciences. Il s'en donne les moyens en créant l'Observatoire de Paris (Figure 11) et en fondant l'Académie royale des sciences, qui n'est autre que l'Académie nationale des sciences actuelle. Pour lui donner une résonance internationale immédiate, il attire les scientifiques européens les plus prestigieux, majoritairement italiens, comme la famille Cassini qu'il installe à Paris en leur faisant un véritable pont d'or.

Ces nouvelles communautés scientifiques produisent de nombreux mémoires, à l'instar de la Société Royale de Médecine (Figure 12), qui établit des tableaux et des rapports mensuels sur la météorologie et l'état de santé des populations. À l'instar de l'Académie Royale des Sciences, la Société Royale de Médecine résulte d'une commande royale faite dans les années 1770 aux médecins hygiénistes. À partir d'un réseau très dense de correspondants en France et à l'étranger, le pouvoir leur demandait d'ana-

Figure 10

Relevés météorologiques effectués à Oxford par le philosophe John Lock au cours de l'été 1666.

Source : Lock J, *The General History of the Air*, cliché : E. Garnier.

1666 A Register kept by Mr. Locke, in Oxford.						
July	h.	Th.	Bar.	Hy.	Wind	Weather.
1	15	71	29 1 ¹		NE 1	Fair.
2	17	71	29 1 ¹		E 1	Rain.
3	21	69	29 2 ¹			Clouds, Lightning.
4	24	67	29 2 ¹		N 1	Clouds.
5	25	67	29 2 ¹		N 1	Clouds.
6	26	64	29 3 ¹		N 1	Cloude.
7	30	69	29 3 ¹	15		Fair.
8	31	67	29 3 ¹	15	NW 0	Fair.
August						
1	15	60	29 2 ¹	20		Clouds.
2	16	59	29 2 ¹	19	N 1	Fair.
3	20	64	29 2 ¹	19		
4	20	59	29 3 ¹	19	N 0	Fair.
5	31	61	29 3 ¹	20	NE 0	Fair.
6	9	61	29 3 ¹	20	NE 1	Fair.
September						
1	6	55	29 3 ¹	17	NE 1	Fair.
2	9	55	29 3 ¹	17	E 2	Clouds.
3	9	52	29 3 ¹	16	E 3	Clouds.
4	9	49	29 4 ¹	16	E 2	Fair.
5	9	47	29 3 ¹	15	E 1	Fair.
6	13	50	29 3 ¹	15	E 2	Dim reddish Sun (thine)
7	20	51	29 2 ¹	14		This unusual Colour of the Air, which without a Cloud appearing, made the Sun-beams of a strange red dim Light, was very remarkable. We had then heard nothing of the Fire of London: But it appeared afterwards to be the Smoak of London that burning, which driven this way by an Easterly Wind, caus'd this odd Phenomenon.
8	22	49	29 1 ¹			
9	9	44	29 2 ¹	15	NE 1	Fair.

Figure 11

L'Observatoire de Paris, grand pôle national de recherche en astronomie, devait servir de lieu de réunion et d'expérimentation pour tous les académiciens. Mais en raison de son éloignement du Paris de l'époque, seuls les astronomes l'utilisèrent.



Cliché : E. Garnier.

Figure 12

Relevés de la Société Royale de Médecine fin XVIII^e siècle sur l'état de la population face aux conditions climatiques.

lyser le lien entre l'état des populations et les conditions climatiques.

Dans les années 1780, une Société européenne de météorologie est créée, la *societas meteorologica palatina*, afin d'effectuer aussi des observations systématiques inscrites dans la durée (Figure 13). Ainsi, dès le milieu du XVII^e siècle, le monde scientifique recourt massivement à des instruments tel le thermomètre, le baromètre, pour établir des séries de données.

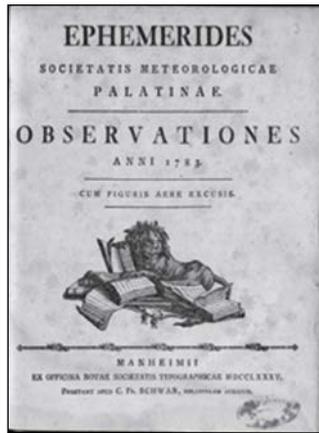


Figure 13

Societas meteorologica Palatina (années 1780 - Révolution française), société météorologique européenne qui utilisait des instruments tel le thermomètre ou le baromètre pour collecter des données climatiques.

1.5. Relai de l'information scientifique par la presse

La presse se développe aussi vite que la science, surtout à partir du XVIII^e siècle, et se fait une spécialité de reporter des informations climatiques dans ses journaux (Figure 14). Le journal de Paris, par exemple, possède, dès les années 1770,

une rubrique météo, et surtout une rubrique hydrographique indiquant les hauteurs de la Seine quand il y a un risque d'inondation.

2 Les grandes fluctuations climatiques du dernier millénaire

La **Figure 15** illustre la rigueur météorologique du mois de février. Les hivers d'antan sont bien connus de nos jours grâce aux glaciologues suisses qui, à partir de l'étude des glaciers alpins, ont fourni des documents synthétiques précieux pour la reconstruction du climat du dernier millénaire.

L'exemple paysager du glacier d'Aletsch

La **Figure 16** illustre les phases de progression ou au contraire de recul du glacier d'Aletsch dans les Alpes. On remarque des périodes d'étiage glaciaire⁶, c'est-à-dire de recul vraiment très fort, notamment pendant l'Âge du Bronze, puis une progression durant l'Âge du Fer qui coïncide avec une période d'extension pour les celtes. Cet exemple historique prouve par la même occasion qu'un climat rigoureux n'est pas forcément synonyme de repli pour l'homme. À contrario, la période romaine du haut empire s'inscrit dans une phase plutôt chaude, sèche, qui s'achève par un retour du froid que certains scientifiques, notamment dendrochronologues, interprètent comme une cause majeure du déclin impérial. La revue *Sciences* a par exemple publié un article dans lequel ses auteurs établissaient un lien certain entre la poussée du froid et le passage du Rhin

6. Abaissement exceptionnel du débit d'un cours d'eau.

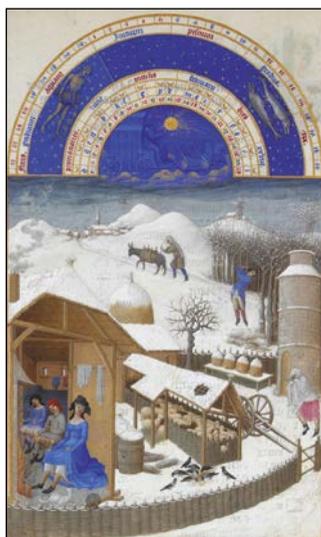


Figure 15

Février, Les très riches heures du duc de Berry, de Paul de Limbourg : une preuve du climat à un moment de l'histoire.

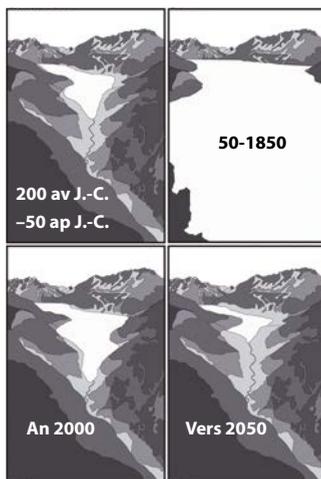


Figure 16

Phases et progression ou de recul des glaciers d'Aletsch.

Source : Garnier E., *Les dérangements du temps, 500 ans de chaud et froids en Europe*, Paris, Plon, 2010, 244p.

par les Alamans⁷, les Francs... en 406. En pratique, l'empire était déjà « barbarisé » depuis belle lurette et d'ailleurs, la majorité des troupes romaines qui tentèrent de s'opposer à l'invasion était déjà composée à 80-90 % de troupes d'origine barbare en voie d'assimilation.

7. Ensemble de tribus germaniques.

Cet exemple historique nous montre donc la complexité du phénomène climatique et de ses conséquences sociales, une réalité qui impose une grande prudence scientifique.

La **Figure 17** met en lumière l'évolution chronologique de l'avancée ou du retrait du glacier. On y voit la poussée maximale durant la période du « petit optimum médiéval » (POM), qui débiterait vers le IX^e siècle et se terminerait au début du XIV^e siècle. La période froide, abordée également dans le **Chapitre de V. Courtillot** dans cet ouvrage *Chimie et changement climatique* (EDP Sciences, 2016), coïncide avec l'expansion des vikings, partis de Scandinavie sur leurs drakkars pour coloniser l'Islande puis le Groenland. Néanmoins, à compter du XIV^e siècle, cette phase d'expansion s'atténue. Les vikings ont tenté de s'adapter, les archéologues ont trouvé les traces, dans les fosses dépotoirs, de plus en plus de poissons, de morses, etc. Mais cela n'a visiblement pas suffi, et brutalement

autour des années 1450, les traces vikings disparaissent totalement. La colonisation scandinave ne reprendra qu'au XVIII^e siècle à la faveur d'un relatif réchauffement.

L'avance du glacier recommence vers les années 1320-1330, au début du Petit Âge Glaciaire (PAG). Cette période nous conduit jusqu'au milieu du XIX^e siècle et est accompagnée par des phénomènes extrêmes tels que le grand hiver de 1709, mais il y en a bien d'autres. Des épisodes de refroidissement interviennent à la veille de la Révolution, probablement liés à l'éruption du Laki⁸ en 1783 et à celle du Tambora⁹ en 1816 (voir le **Chapitre de M. Legrand** dans *Chimie et changement climatique*). Ces deux événements volcaniques eurent un impact climatique et sanitaire mondial. Il y a donc une assez bonne coïncidence entre l'évolution de ce qu'Emmanuel Le Roy Ladurie appelle l'hyper Petit Âge Glaciaire et l'activité volcanique de l'époque.

8. Le plus grand volcan d'Islande.
9. Éruption volcanique en Indonésie.

Figure 17

La frise chronologique des fluctuations du glacier d'Aletsch. OAB : Optimum Âge du Bronze, AGF : Âge Glaciaire du Fer, POR : Petit Optimum Romain, POM : Petit Optimum Médiéval, PAG : Petit Âge Glaciaire.

Source : Garnier E., *Les dérangements du temps, 500 ans de chaud et froids en Europe*, Paris, Plon, 2010, 244p.

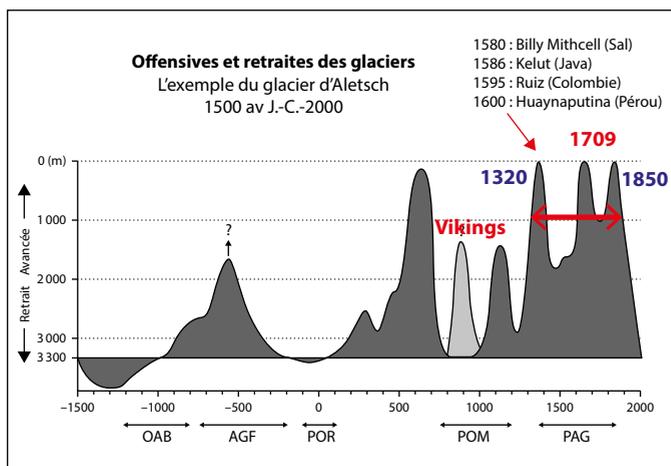




Figure 18

A) Les assauts du glacier d'Argentière vers 1850 ; B) les assauts du glacier d'Argentière en 1967 – Le climat depuis l'an mil.

Source : photo prise par E. Le Roy Ladurie.

La **Figure 18** compare la photo du glacier d'Argentière vers 1850 avec celle du même glacier en 1966.

3 Les « monstruosités » du temps ou les extrêmes climatiques, des signaux climatiques contradictoires

L'historien est plus pertinent pour parler des extrêmes que

des fluctuations climatiques, et notamment pour expliquer que ces phénomènes, contrairement à ce qu'on affirme trop souvent et maladroitement, ne sont pas des phénomènes inédits. On trouve des catastrophes liées ou engendrées par des événements extrêmes à foison dans les archives. La **Figure 19** est un exemple de gigantesque raz de marée survenu en Allemagne en 1634.



Figure 19

Gravure de Mandränke (raz-de-marée) du 11-12 octobre 1634 à Schleswig-Holstein en Allemagne.

3.1. Les sécheresses

La **Figure 20** est le produit de recherches historiques conduites ces dernières années dans le cadre d'un programme transdisciplinaire européen sur les sécheresses¹⁰. En rupture avec les fréquentes affirmations selon lesquelles les risques de sécheresses se sont accrus depuis cinquante ans, le gra-

phique ne fait pas état d'une recrudescence de ce type d'extrêmes en France (**Figure 20A**). En revanche, en Angleterre, on observe plutôt une tendance à la hausse (**Figure 20B**).

3.2. Les cyclones tropicaux

L'approche historique concernant la fréquence et la sévérité des cyclones tropicaux des 400 dernières années intéresse vivement les assureurs en raison du coût de ces événements extrêmes¹¹. Les

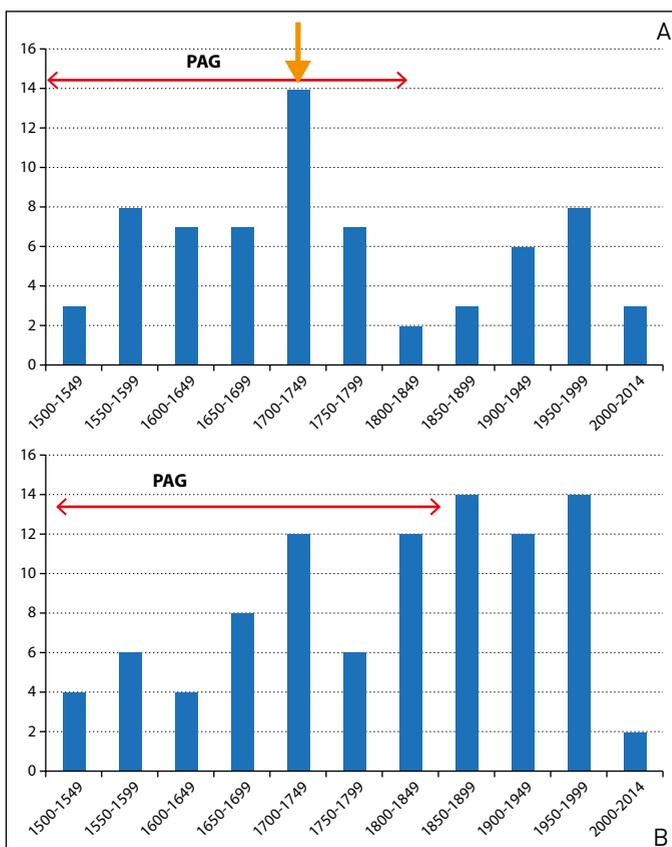
10. Garnier E., *A historic experience for a strengthened resilience. European societies in front of hydro-meteors 16th-20th centuries*, dans Quevauviller P. (eds.), *Prevention of hydrometeorological extreme events-Interfacing sciences and policies*, Chichester, John Wiley & Sons, vol 1, 2014, p.3-26.

11. Garnier E., Desarthe J., *Cyclones and societies in the Mascarene islands 17th-20th centuries*, *American Journal of Climate Change*, 2013, n° 2, p.1-13.

Figure 20

Évolution des tendances à la sécheresse par période de 49 ans allant de 1500 à 2014 en France (A) et en Angleterre (B).

Source : Garnier E., *A historic experience for a strengthened resilience. European societies in front of hydro-meteors 16th-20th centuries*, 2014.



résultats statistiques tirés des archives coloniales livrent un tableau lui aussi complexe. Dans les Mascareignes, la fréquence des cyclones est très soutenue à compter des années 1650 ; elle décline ensuite entre le milieu du XIX^e siècle et les années 1950. Le cas réunionnais est plus complexe à interpréter puisque l'on ne note pas de fluctuations sensibles avant le milieu du XX^e siècle. En revanche, ces deux espaces insulaires connaissent une même recrudescence exceptionnelle au cours des cinquante dernières années (Figure 21).

3.3. Les submersions

Les submersions ne sont pas des phénomènes extrêmes aussi inédits qu'on le pense. Le cas de La Faute-sur-mer (Figure 22) a été étudié par les historiens du climat, avec cinq autres cas semblables, dans le cadre d'un programme européen¹². Au lendemain de la catastrophe de la Faute-sur-mer, les mots clés trouvés dans tous les media étaient « inédit », « jamais vu », « imprévisible »... Personne, au lendemain du Xynthia¹³, ne semblait avoir conservé

12. Garnier E., Henry N., Desarthe J., Visions croisées de l'historien et du courtier en réassurance sur les submersions. Recrudescence de l'aléa ou vulnérabilisation croissante ?, dans : Hallegatte S., Przulski V., Gestion des risques naturels. Leçons de la tempête Xynthia, 2012, Editions Quae, Paris, pp.107-130.

13. Tempête de Xynthia, dépression météorologique majeure ayant frappé plusieurs pays européens entre le 26 février et le 1^{er} janvier 2010.

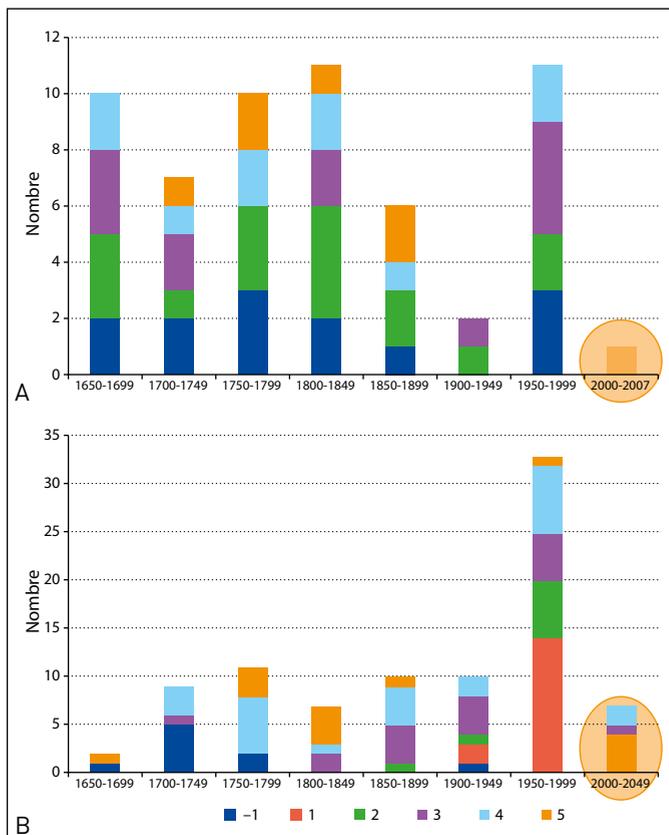


Figure 21

A) Nombre de cyclones tropicaux à Mascareignes (Réunion, Maurice) entre 1650 et 2000 ; B) nombre de cyclones tropicaux aux Antilles entre 1650 et 2000.

Les couleurs indiquent les catégories d'intensité des cyclones (-1 peu faible et 5 pour un événement très sévère).

la mémoire des événements antérieurs du même type, tels que représentés dans la Figure 23.

Les submersions de la Faute-sur-mer en 1928 ou en 1937 avaient pourtant concerné tout l'arc atlantique français jusqu'au littoral espagnol. Cependant, très peu de victimes avaient été à déplorer grâce à l'application d'un principe ancestral de prévention fondé sur un bâti en seconde ligne, c'est-à-dire situé géné-

Figure 22

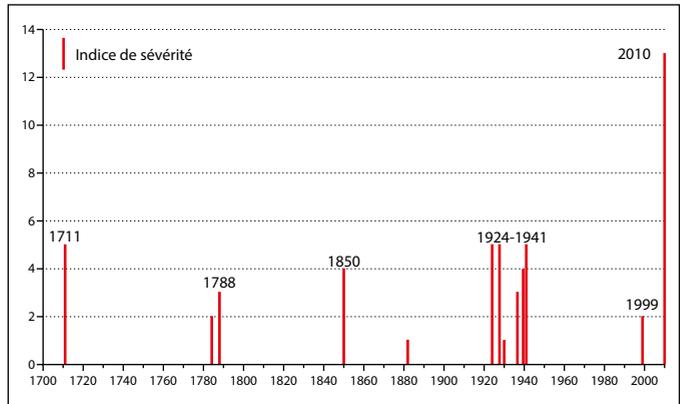
Une du journal Ouest Eclair relatant la submersion de 1928 sur le littoral atlantique, notamment à La Faute-sur-mer.



Figure 23

Historique des événements hydro-météorologiques extrêmes à La Faute-sur-Mer.

Source : Garnier E., European RISCKIT Project.



ralement pas à moins d'un kilomètre. Les plans de la Faute-sur-mer à partir des cartes d'état-major de l'armée à l'époque sont éloquentes, eux qui montrent l'actuel site urbanisé sous la forme d'une dune et d'une plaine inondable quasi inhabitée. Le futur site de la ville servait alors de protection à l'Aiguillon-sur-mer et n'accueillait que quelques cabanes de pêcheurs. En conséquence, les rares dommages causés par les submersions de 1924 et de 1937 ne concernaient que des terres agricoles.

Nous vivons aujourd'hui dans des sociétés sans mémoire.

Dans les archives, la mémoire a une espérance de vie d'au moins une génération, c'est-à-dire 25 à 30 ans, beaucoup plus, en pratique, pour la plupart des extrêmes à l'origine de catastrophes. De nos jours, cette mémoire des catastrophes s'est considérablement réduite pour désormais être conservée durant 5 à 8 ans. Quel Français interrogé dans la rue aujourd'hui serait en mesure de se souvenir de la grande tempête de Lothar¹⁴ en 1999, pourtant qualifiée

14. Tempête Lothar, la première des deux tempêtes de fin décembre 1999 en Europe.

à l'époque de « tempête du siècle » ?

Pour des raisons évidentes d'accès et de traitement paléographique des archives, les données historiques sont sous-exploitées par les modélisateurs chargés de prédire les catastrophes littorales à venir. Cependant, les choses changent progressivement depuis une vingtaine d'années, avec une intégration des données historiques dans les modèles. Désormais, le contenu des archives est très prisé des autres communautés scientifiques qui l'utilisent pour tester les systèmes de prévision et les utiliser comme un outil de simulation

a posteriori, permettant ainsi d'évaluer leur capacité à faire des simulations prédictives sur des échelles de plusieurs décennies.

Les données historiques permettent d'analyser précisément un évènement ancien donné, à partir du XVII^e ou XVIII^e siècle, et d'en mesurer les conséquences matérielles et humaines. Dans un second temps, les modélisateurs en réassurance simulent la catastrophe ancienne dans un contexte démographique et économique actuel. Encore rare de la part de nos disciplines, ce type d'expérience nécessite de la part des chercheurs une grande capacité à dialoguer.

L'historien et les changements climatiques

L'historien peut contribuer à rendre plus robustes des modèles de changements climatiques dans le cadre de travaux de recherche transdisciplinaires. Mais plus encore, l'historien apporte une connaissance totalement inédite sur la fréquence des évènements extrêmes qui aujourd'hui focalisent tant l'attention de nos décideurs et de nos concitoyens. Ce qui revient à dire que ces recherches doivent nourrir les modèles, comme cela est rappelé dans le **Chapitre de H. Le Treut** (*Chimie et changement climatique*, EDP Sciences, 2016) en termes de prédiction et de prévention. Néanmoins, pour être utiles, elles doivent s'inscrire à des échelles régionales, condition sine qua non à une adhésion des populations exposées à des risques locaux.

Plus encore que les fluctuations du climat, les historiens, du haut de leurs mètres cubes d'archives, observent en réalité des siècles

de mesures d'adaptations élaborées par nos devanciers. Pour cette raison, l'historien doit aussi orienter ses recherches vers la gestion des risques et le retour des expériences historiques. *De facto*, les sociétés ne cessèrent de s'adapter à l'adversité climatique comme en témoigne, entre autres, des paysages comme le bocage conçu comme un moyen de retenir l'eau et d'éviter ces tsunamis fluviaux décrits régulièrement dans nos médias au cours de la dernière décennie. En effet, l'historien ne peut qu'être frappé par la brutalité des phénomènes contemporains comparés aux inondations du passé. À cette époque, les noyaux de populations étaient autrefois protégés par des zones tampons comme des milieux humides entretenus pour absorber une partie des eaux et répondre à des attentes économiques (élevage, pêche).

Oui, il y a des retours d'expériences. La difficulté est d'appliquer ces retours d'expériences qui sont autant de pistes pour réaménager nos territoires, une priorité absolue dans le cadre des débats sur le changement climatique. La vulnérabilité de notre société n'a cessé d'augmenter depuis un demi-siècle. C'est sans commune mesure avec ce qu'elle était il y a de cela un siècle, où il existait des systèmes de prévention extrêmement efficaces qui expliquent le faible nombre de décès quand survenaient des extrêmes climatiques.

De nombreux comités ministériels se réunissent avec, au final, très peu de retombées concrètes sur le terrain. Il suffit de parler de réaménagement ou de remaniement du trait de côte (si on reste dans le domaine littoral) pour que se produise une véritable levée de boucliers en raison des enjeux fonciers locaux. Force est donc de constater un fort différentiel entre ce qui est affiché et la réalité du terrain.

Partie 2

La chimie : un outil
pour l'étude du changement
climatique

La chimie de la glace : une archive de notre environnement passé

Directeur de Recherche au Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement à Grenoble LGGE¹, Michel Legrand est chimiste de l'atmosphère et des archives glaciaires. Il est membre de ce laboratoire depuis 1978.

1 Comment la glace archive-t-elle notre environnement passé ?

1.1. Les sites de forages de glace

En Antarctique et au Groenland (*Figure 1*), les températures sont très froides et la neige s'y accumule sans aucune fusion sur de très longues périodes de temps. Au centre de l'Antarctique, il fait en moyenne annuelle -55 °C , et il ne tombe que 10 cm de neige par an – l'équivalent de 3 cm d'eau par an. C'est un véritable désert. La calotte de glace fait 3 000 mètres d'épaisseur ; cela permet un enregistrement de données climatiques de qualité sur une très longue durée.

Les différents grands forages réalisés au Groenland et en

Antarctique sont reportés sur la *Figure 2*. Les périodes de temps accessibles dépassent 100 000 ans au Groenland, et atteignent pratiquement 800 000 ans en Antarctique.

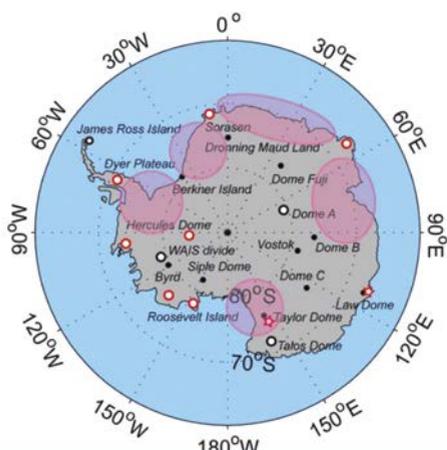
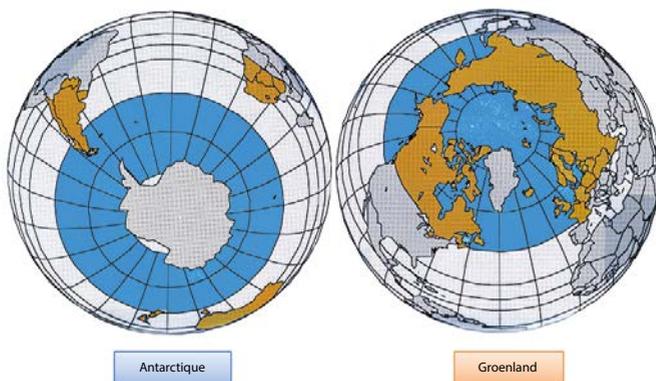
Aux moyennes latitudes, il existe aussi des glaciers dits « froids ». En effet, au-dessus de 4 000 m environ, la température moyenne annuelle y est inférieure à -10 °C et on n'a pas de fusion. Avec quelques centaines de mètres d'épaisseur, ces glaciers archivent facilement les 100 à 200, voire même 1 000 dernières années selon les situations ; ce qui permet de documenter l'entrée dans ce qu'on appelle la période Anthropocène².

2. Anthropocène (du grec ancien *Anthropos* « l'être humain », *Kainos* « récent, nouveau ») se définit comme une nouvelle époque, qui n'est pas censée exister sur l'échelle des temps géologiques, et qui est influencée par l'homme.

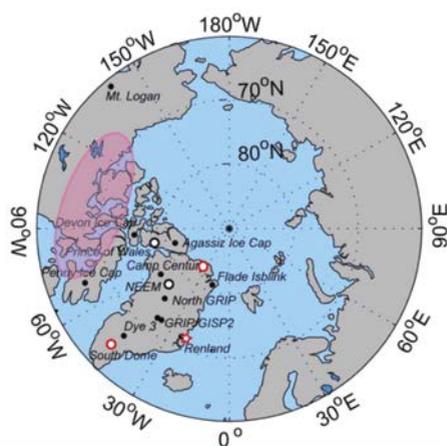
1. <http://lgge.osug.fr>

Figure 1

Les calottes glaciaires de l'Antarctique et du Groenland : zones d'archive du climat et de l'atmosphère (jusqu'à près de 1 million d'années).



Antarctique : Vostok (T = -55 °C, A = 2 g.cm⁻².an⁻¹) : 420 000 ans
Dome C (T = -53 °C, A = 3 g.cm⁻².an⁻¹) : 750 000 ans



Groenland : GRIP (T = -32 °C, A = 21 g.cm⁻².an⁻¹) : 105 000 ans
NEEM (T = -29 °C, A = 22 g.cm⁻².an⁻¹) : 130 000 ans

Figure 2

Positions des différents sites de forage étudiés en Antarctique et au Groenland.

A : épaisseur moyenne annuelle de neige déposée.

Source : Jouzel J. (2013). A brief history of ice core science over the last 50yr, Clim. Past., 9 : 2525-2547.

En Eurasie, on trouve ces sites froids dans les Alpes, dans le Caucase puis en Asie centrale et jusqu'au Kamchatka sur certains volcans (Figure 3).

1.2. La glace, archive du climat et de la composition chimique de l'atmosphère

Les « archives climatiques » dont on dispose sont nombreuses et variées. Elles peuvent être sédimentaires – sédiments lacustres, sédiments marins – ou les an-

neaux d'arbres, les coraux,... ou la glace. Celle-ci occupe une position particulière, parce qu'elle archive non seulement le climat, mais une quantité d'autres paramètres qui renseignent sur la composition chimique de l'atmosphère passée.

Le flocon de neige, dès sa formation, enregistre, à travers sa composition isotopique, un paramètre qui permet de remonter à la température de formation de la précipitation et donc au climat de

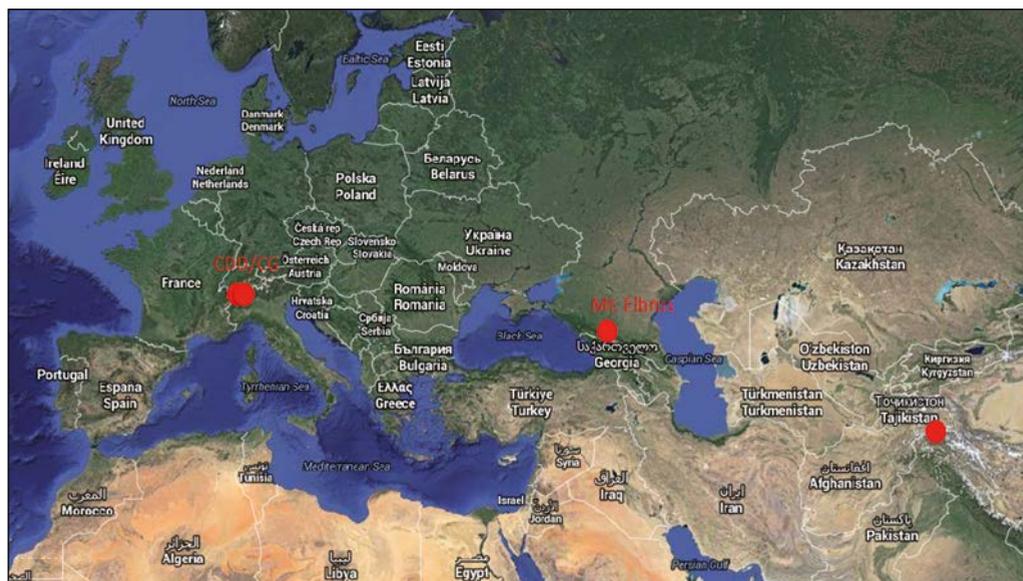


Figure 3

Localisation des glaciers froids de moyenne latitude en Eurasie : les Alpes, le Caucase, et l'Asie centrale (points rouges).

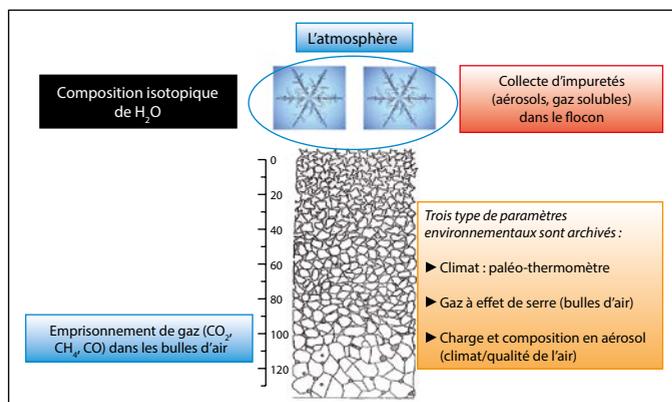


Figure 4

Les différents paramètres environnementaux archivés par la glace depuis la formation des flocons de neige dans l'atmosphère jusqu'à la formation de la glace en profondeur.

l'époque où le flocon s'est déposé (Figure 4). En même temps, ce flocon piège un certain nombre d'impuretés atmosphériques, comme les aérosols (voir le **Chapitre de G. Brasseur** dans cet ouvrage *Chimie et changement climatique*, EDP Sciences, 2016). Enfin, quand la neige se den-

sifie et se transforme en névé³ puis en glace, elle emprisonne

3. Névé : partie amont d'un glacier où la neige se transforme en glace, par mécanismes de tassement et de fusion partielle. Ce mécanisme permet d'emprisonner des bulles d'air, dont les teneurs en gaz, comme le gaz carbonique, pourront être étudiées.

sonne de l'air dans les bulles qui archivent alors de précieuses informations comme le contenu en gaz carbonique de l'atmosphère passée.

1.3. Comment dater la glace ?

1.3.1. Par stratigraphie

La neige enregistre des informations sur l'état de l'atmosphère au moment de la formation du flocon. Elle enregistre donc les paramètres saisonniers. Par exemple, la **Figure 5** représente trois paramètres saisonniers enregistrés sur les cinq premiers mètres de neige déposés au centre du Groenland :

– le premier, c'est **la composition isotopique de l'eau** (isotopes stables de la molécule d'eau). Il constitue un véritable paléothermomètre⁴, comme le montrent les variations très importantes qui corres-

4. En géochimie, un paléothermomètre représente un couple d'isotopes (en général oxygène 16/ oxygène 18 présent dans l'eau) composant les roches qui permet de préciser la température à laquelle sont apparus et se sont déposés les sédiments dans le temps.

pondent au passage de l'été à l'hiver : il permet de compter les années ;

– le deuxième paramètre est **la concentration en eau oxygénée H_2O_2** . L'eau oxygénée présente dans l'atmosphère est parfaitement miscible à l'eau et se retrouve dans les flocons de neige. Elle a besoin de rayonnement solaire pour se former dans l'atmosphère ; sa concentration présente donc un maximum dans la couche de neige d'été ;

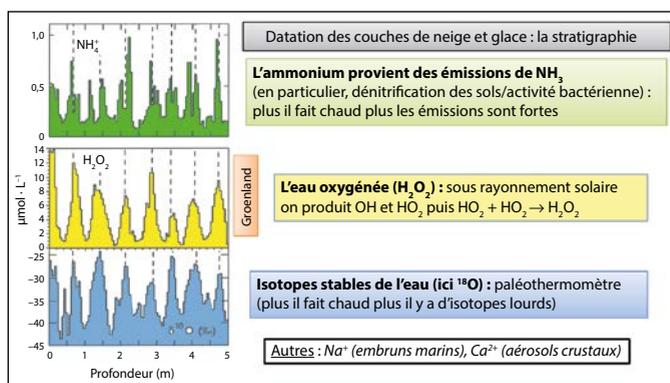
– le troisième paramètre correspond à **un aérosol atmosphérique**, qui présente des fluctuations saisonnières. La **Figure 5** donne l'exemple de l'ammonium, NH_4^+ , qui est dépendant des émissions d'ammoniac (NH_3) par les sols, maximales en été. Mais les aérosols contiennent beaucoup d'autres indicateurs chimiques, le sodium Na^+ par exemple, qui retrace les embruns marins en relation directe avec l'intensité des tempêtes.

La méthode stratigraphique présente une difficulté intrinsèque liée à l'action du vent. En région centrale Antarctique, il fait tellement froid et neige si peu (10 à 20 cm de neige par

Figure 5

Datation par stratigraphie de la neige déposée au centre du Groenland sur les cinq premiers mètres de neige : l'enregistrement des paramètres isotopiques de l'eau (en bleu), de l'eau oxygénée (en jaune) et de l'ammoniac (en vert) permet de compter les années.

Source : Legrand M., Mayewski P. (1997). Glaciochemistry of polar ice cores: A review, Reviews of Geophysics, 35 : 219-243.



an), que le vent, aussi faible soit-il, parvient à mélanger les couches été-hiver ; ce qui rend caduque la méthode stratigraphique (**Figure 6**). On doit alors rechercher des horizons repères⁵.

1.3.2. Par le recours aux horizons repères

Les éruptions volcaniques

L'horizon repère favori des climatologues est le volcan. Son activité se traduit par l'émission dans l'atmosphère de dioxyde de soufre (SO₂), qui s'oxyde rapidement en sulfate et est facilement mesuré dans les glaces. La qualité de l'horizon repère volcanique dépend du type d'éruptions : celles-ci ont un impact soit relativement local, soit au contraire à l'échelle planétaire si les gaz émis ont gagné la très haute atmosphère (voir l'**Encart : « Deux types d'éruptions volcaniques bien différents pour les climatologues »**).

Les tests nucléaires

Les rejets radioactifs fournissent également des horizons de datation très utiles (**Figure 8**). Les tests nucléaires effectués dans l'atmosphère par les États-Unis et l'ex-Union Soviétique ont envoyé des produits de fission jusque dans la moyenne atmosphère essentiellement entre les années 1955 et 1965. On les retrouve parfaitement

bien dans les carottes du Groenland et de l'Antarctique où ils fournissent des horizons repères.

L'accident nucléaire de Tchernobyl en 1986 fournit aussi un horizon repère, mais seulement dans l'hémisphère Nord (dans les Alpes par exemple) parce que le nuage n'a pas atteint une altitude suffisante pour contaminer l'ensemble du globe.

Ces différents horizons repères sont limités aux périodes récentes puisqu'ils dépendent de la mémoire humaine. Il faut d'autres méthodes pour dater les forages très profonds, très anciens. La méthode de choix est l'utilisation de modèles mathématiques des écoulements de la glace, matériau plastique qu'on sait étudier expérimentalement et modéliser. Les résultats des modèles peuvent être validés par comparaison avec d'autres archives climatiques, comme les sédiments marins, qui peuvent être datés au carbone 14 jusqu'à environ 60 000 ans, ou encore les coraux jusqu'à 750 000 ans avec la méthode Uranium-Thorium⁶.

Sur le terrain

Suite au progrès des méthodes d'analyses, les paramètres



Figure 6

Quand on a moins de 20 cm de neige par an, l'érosion éolienne perturbe très facilement la stratigraphie.

5. En climatologie, un horizon repère est une unité stratigraphique de même âge qui est présente dans différents lieux géographiques (par exemple, la couche de cendre liée à une éruption volcanique). Elle permet d'établir des corrélations entre différents enregistrements dans différentes archives.

6. La méthode Uranium-Thorium est une méthode de datation radiométrique (mesure de l'activité couplée entre l'uranium et le thorium) qui permet de remonter à l'âge de formation des sédiments. Cette méthode permet de remonter plus loin dans le temps que la méthode de datation au carbone 14 car l'uranium et le thorium possèdent une constante de temps cinq à six fois plus grande que le carbone.

DEUX TYPES D'ÉRUPTIONS VOLCANIQUES BIEN DIFFÉRENTS POUR LES CLIMATOLOGUES

Les volcans « Tambora » (**Figure 7A**) et « Laki » (**Figure 7B**) ont donné lieu à deux types d'éruptions très différentes. Le Tambora est une éruption explosive, qui a renvoyé dans l'atmosphère vers 30 à 40 km d'altitude quelque 60 millions de tonnes de SO_2 , que l'on retrouve dans les deux hémisphères, aux deux pôles, alors que l'émission du Laki était de type fissurale. La **Figure 7B** donne l'image d'une petite éruption de type Laki : c'est celle qui s'est produite en 2014 en Islande. Elle peut émettre énormément de SO_2 , mais le nuage ne monte pas très haut et ne gagnera donc pas l'ensemble du globe.

Ces différences sur la dispersion du panache entraînent des différences sur les retombées dans la glace. Ainsi l'éruption du Laki n'est enregistrée qu'au Groenland, et pas du tout en Antarctique (**Figure 7C**).

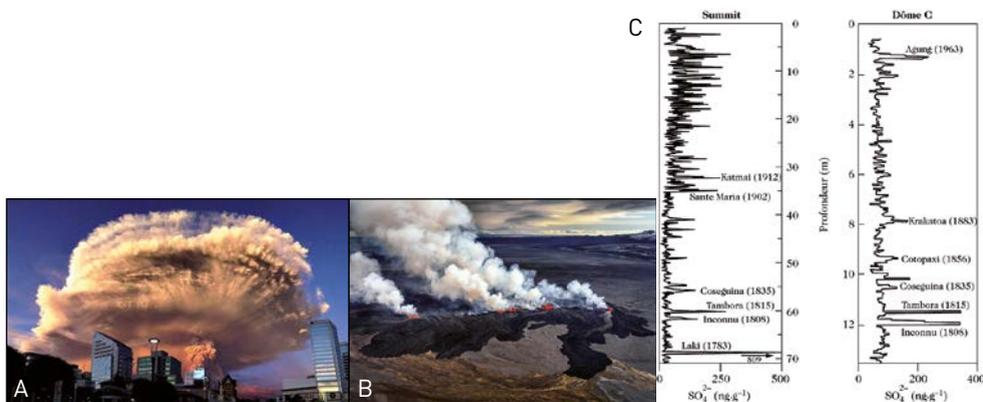


Figure 7

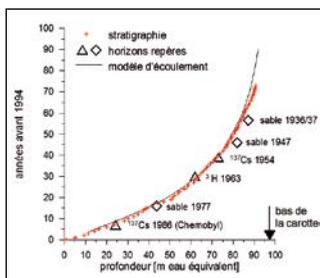
A) Éruption volcanique explosive de type Tambora (1815) ; B) éruption fissurale en Islande de type Laki (1783) ; C) les enregistrements en sulfates au Groenland (à gauche) et en Antarctique (à droite) montrent l'incidence différente des panaches du Laki et du Tambora.

Source : Fig 7C : Legrand M., Paléoenvironnement et archives glaciaires, dans « Physique et Chimie de l'Atmosphère », Chapitre 9, 390-414, R. Delmas, G. Mégie, V.H. Peuch eds., Belin, 2005.

Figure 8

Datation d'une carotte du col du Dôme (massif du Mont Blanc) par comptage des années sur le profil de NH_4^+ (croix), en utilisant les horizons radioactifs (triangles) et les arrivées de sables sahariens (carrés), et un modèle d'écoulement (trait plein).

Source : Legrand M. (2005).



physico-chimiques sont de plus en plus souvent mesurés sur site au fur et à mesure de l'extraction des carottes. La **Figure 9** montre un laboratoire

situé au Groenland où y ont été analysées les carottes.

1.4. Les différents paramètres archivés par la glace

1.4.1. Les flocons de neige : un paléothermomètre

Le premier paramètre environnemental enregistré par les flocons de neige est la composition isotopique, qui est un véritable paléothermomètre. Il y a trois isomères



Figure 9

Une tranchée scientifique mise en place lors du forage de NEEEM au Groenland pour la découpe des carottes de glace et leur mesure in situ.

Source : Jouzel J. (2013).

isotopiques de la molécule d'eau ; le principal, H_2O^{16} , puis deux un peu plus lourds, HDO^{16} et H_2O^{18} . Au cours des phénomènes d'évaporation et de condensation de l'eau, une véritable distillation entre ces espèces s'installe ; la teneur en espèce isotopique d'une précipitation sera donc liée à sa température de formation (**Figure 10**). Cet effet rend compte des variations observées des teneurs en O^{18} ou en deutérium (D) des précipitations en fonction de la température du site où elles sont collectées (**Figure 11**).

1. NEEEM (North Greenland EEMian ice drilling) est un site de forage et le nom d'un projet international qui vise à obtenir un enregistrement climatique continu couvrant l'intégralité de la dernière période interglaciaire via un nouveau forage profond au nord-ouest du Groenland. NEEEM-France combine l'étude de ce forage à la modélisation climatique, et à la modélisation de l'écoulement de la calotte groenlandaise.

1.4.2. Le deutérium et l'oxygène 18

La **Figure 12A** est un enregistrement qui vient de Vostok et donne les variations en rapports isotopiques de l'oxygène 18 le long d'un carottage de glace. En première approximation, le rapport isotopique de la glace peut se convertir en températures passées en appliquant les relations observées sur la **Figure 11**. Pour être rigoureux, on doit cependant tenir compte du fait que la composition isotopique de l'océan a légèrement changé au cours du passé, parce que le niveau des mers s'est abaissé d'environ 120 m, ce qui a modifié la composition isotopique de l'océan qui sert de référence (la valeur du SMOW) (**Figure 12B**).

Le profil ainsi corrigé montre que le climat passé a oscillé avec un écart de $10^\circ C$ environ entre deux situations types : les périodes interglaciaires chaudes (telles que celle que

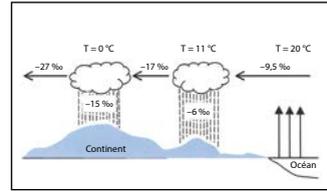


Figure 10

La phase vapeur de l'eau s'appauvrit en isomères lourds à chaque précipitation. La variation des rapports isotopiques dans les précipitations s'exprime en ‰. Le rapport isotopique d'un échantillon (R) s'exprime par rapport à la composition de l'eau de mer : $\delta = 1000 (R/R_{SMOW} - 1)$, où SMOW est « Standard Mean Ocean Water », réservoir d'eau : $D/H = 155,76 \cdot 10^{-6}$; $O^{18}/O^{16} = 2005,2 \cdot 10^{-6}$.

Figure 11

Décroissance des teneurs en isotopes lourds observée dans la précipitation collectée dans différents sites : plus il fait froid, moins il y a d'isotopes lourds.

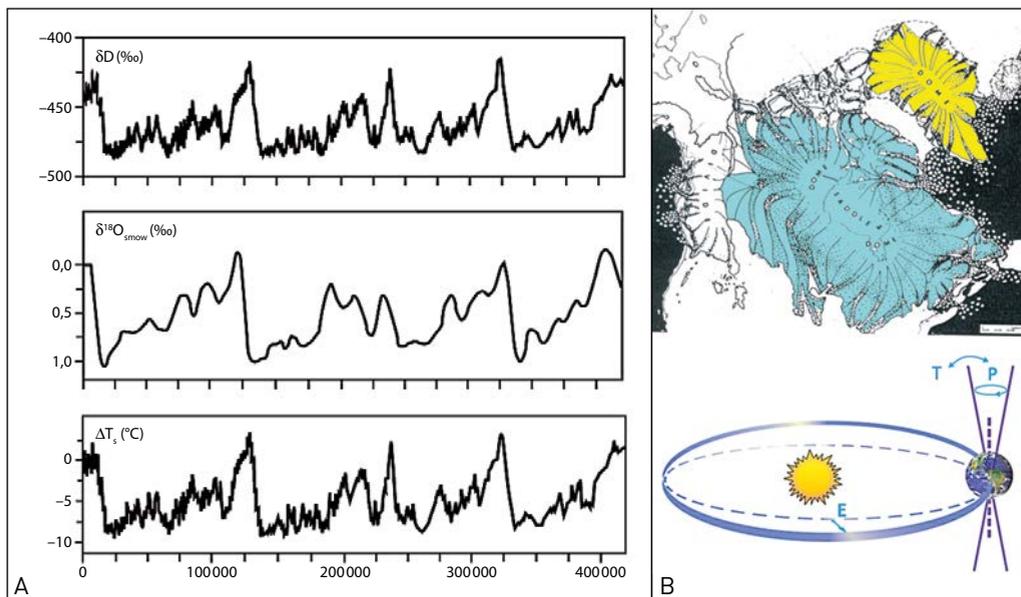
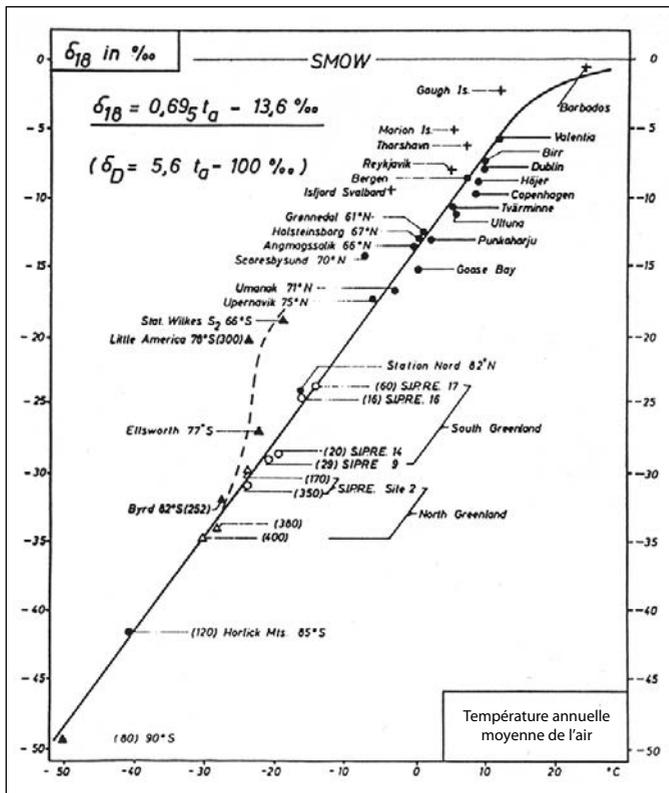


Figure 12

A) Oscillations climatiques entre les maximums glaciaires et les stades interglaciaires au centre de l'Antarctique mesurées par le rapport isotopique de la glace. L'amplitude de l'oscillation climatique est d'environ 10 °C ; B) correction de changement de composition isotopique de l'océan (SMOW) en période froide (stockage d'eau douce sur les continents et abaissement du niveau des mers de 100 m).

nous connaissons), suivies de périodes très froides, comme il y a 20 000 ans. La succession de ces âges glaciaires et interglaciaires révèle les périodicités des mouvements de l'axe de rotation de la Terre et de l'orbite Terre-Soleil (20 000, 40 000 et 100 000 ans). Ces variations correspondent à la théorie de Milankovitch⁷.

7. La théorie de Milutin Milankovitch, élaborée en 1941, rend compte de l'alternance des cycles glaciaires et interglaciaires durant le Quaternaire. Une glaciation se produit lorsque les hautes latitudes de l'hémisphère Nord reçoivent un minimum de rayonnement solaire durant l'été. Trois paramètres astronomiques jouent un rôle important dans la distribution de l'insolation sous les hautes latitudes : l'excentricité de l'orbite terrestre, l'obliquité de l'axe de rotation de la Terre par rapport au plan de l'écliptique et la précession des équinoxes.

2 Le climat et les gaz à effet de serre dans le passé

Une fois déposés, les flocons de neige s'arrondissent rapidement et la neige se transforme en névé. Suite à la densification de ce matériau, on commence à emprisonner de l'air, et cet air contient des informations directes sur l'atmosphère (Figure 13A). Pour l'analyse de ces bulles, il convient d'extraire l'air. La meilleure méthode pour le faire est de procéder par broyage ; en procédant par fusion, on a des résultats parfois entachés d'erreurs. Ainsi, la présence importante de carbonates dans la glace du Groenland datant du dernier maximum glaciaire que montre la Figure 13B empêche de faire de bonnes mesures de CO₂ après extraction du gaz par fusion de la glace.

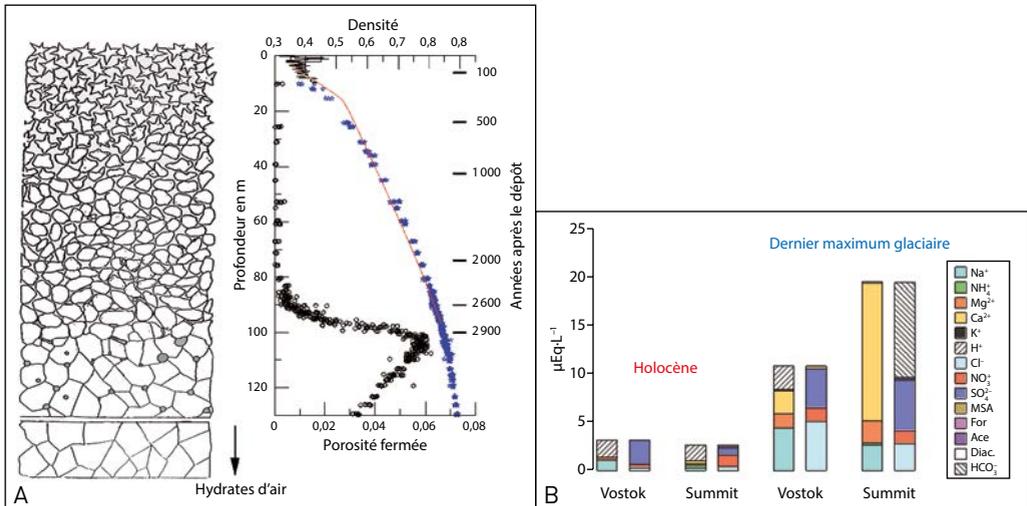


Figure 13

A) Porosité et densité de la glace mesurées en fonction de la profondeur à Vostok ; B) concentrations en différents composés chimiques mesurés dans la glace de l'Holocène (les 10 000 dernières années) et du dernier maximum (il y a 20 000 ans environ) à Vostok et à Summit.

Source : Legrand M. (2005).

À titre d'illustration de l'évolution d'un gaz à effet de serre au cours du temps, on regarde la concentration de méthane CH_4 dans l'atmosphère depuis un millier d'années. Les mesures directes des concentrations de méthane dans l'atmosphère ont commencé en 1985, donc après le début de l'ère industrielle, et sont reportées en rouge sur le diagramme de la **Figure 14**. L'analyse des carottes de glace a permis de remonter assez loin dans le temps pour reconstruire toute l'histoire de l'augmentation du méthane (**Figure 14**). Cette augmentation suit l'accroissement de la population mondiale qui a entraîné l'accroissement de l'élevage des ruminants, de la culture du riz et de l'extraction du gaz naturel. Il existe

aussi une émission naturelle de méthane au-dessus des zones humides.

Les études réalisées sur la glace permettent de remonter beaucoup plus loin dans le temps. La **Figure 15** donne les variations de gaz à effet de serre sur une durée de 800 000 années. La courbe noire correspond au deutérium et montre l'existence de huit cycles climatiques (températures). La courbe en bleu correspond au méthane et montre de très fortes fluctuations, avec une périodicité voisine de 20 000 ans. Elles sont liées aux variations d'insolation en été dans l'hémisphère Nord qui influence la mousson et donc l'émission de méthane des zones humides.

Les variations de gaz carbonique sont, pour une bonne part, attribuables à l'océan (voir le **Chapitre d'A. Cazenave** dans *Chimie et changement climatique*). La décroissance des teneurs en CO_2 durant les périodes froides résultent, eux, de plusieurs modifications du puits océanique de CO_2 en réponse au climat. En effet, les changements de température, salinité et pH de l'océan, ainsi que la circulation thermo-haline, en réponse aux extensions de glace de mer, ont rendu le puits physique océanique de CO_2 plus important en période froide.

Le profil de l'oxyde d'azote N_2O reste encore préliminaire du fait de problèmes résiduels de mesure mal cernés. Toujours est-il que les concentrations de ces trois gaz à effet de serre diminuent clairement dans les périodes glaciaires ; *a priori*, ils ont donc contribué à l'abaissement des tempéra-

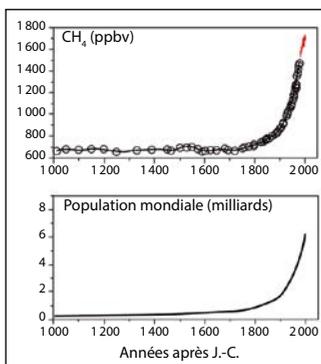


Figure 14

Les émissions de méthane augmentent depuis les années 1800, et suivent les augmentations de la population mondiale dans le temps. Le méthane a des sources naturelles (30 %) dominées par les zones inondées (tropiques et boréales) et des sources anthropiques (70 %) dont l'élevage (15 %), la culture de riz (12 %) et l'extraction du charbon/gaz/pétrole (20 %).

Source : Legrand M. (2005).

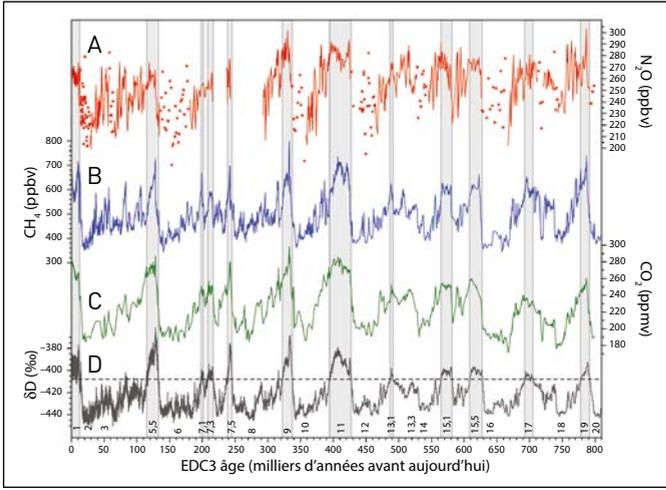


Figure 15

Les concentrations en gaz à effet de serre au cours des grandes variations climatiques témoignent de l'existence d'une relation forte avec le climat passé et les fréquences de Milankovitch :
 A) oxyde d'azote N_2O ;
 B) méthane CH_4 ;
 C) gaz carbonique CO_2 ;
 D) composition isotopique de l'eau (deutérium).

Source : Jouzel J. (2013).

tures. Mais pour aller plus loin sur cette question, en particulier sur la relation de « cause à effet », on doit encore mieux comprendre le décalage entre l'âge du gaz occlus et celui de la glace qui l'entoure.

3 Rôle et complexité de l'aérosol atmosphérique

Il existe une très grande diversité spatio-temporelle d'aérosols, espèces à temps de vie dans l'atmosphère très courts, comparé à celui des gaz à effet de serre. Leurs

effets sur le climat dépendent de leur taille, de leur composition chimique ; certains sont absorbants des rayonnements, certains rétrodiffusent la lumière (Figure 16).

La Figure 17 fait une revue des différentes sources d'aérosols atmosphériques. Certaines sont naturelles, d'autres anthropiques ; il y a de gros aérosols comme les embruns marins, les poussières désertiques, les débris végétaux et de tout petits qui sont produits par oxydation de gaz comme SO_2 ou les composés de type hydrocarbures, émis soit par l'homme soit par

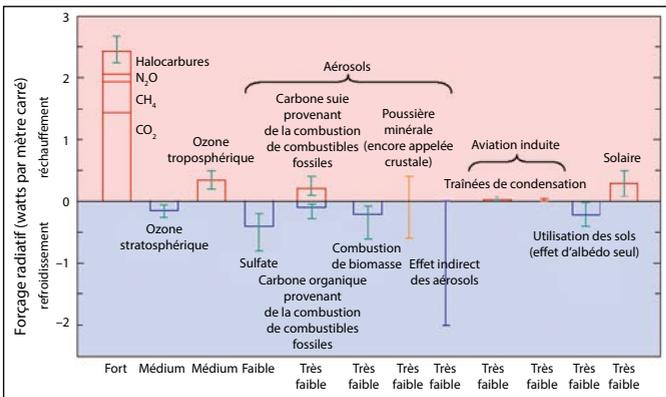
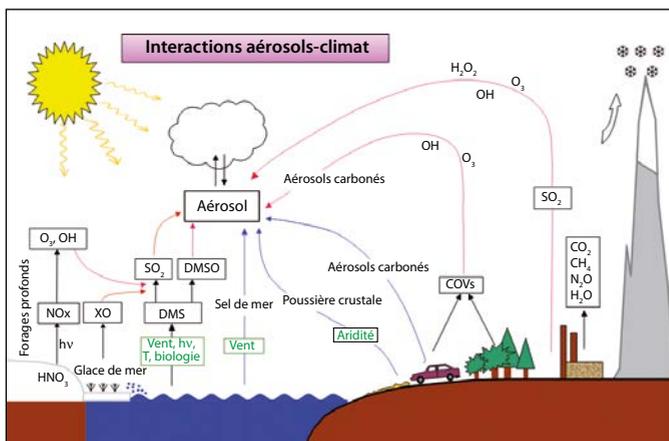


Figure 16

La difficulté d'appréhender le rôle climatique des aérosols, illustrée par une diversité de composés chimiques.

Figure 17

Les sources primaires et secondaires d'émissions d'aérosols naturelles et anthropiques. L'aérosol est un acteur important qui a un impact sur la santé publique et la pollution de l'air, sur le climat global et régional.



la végétation. Cette diversité en est très complexe.

3.1. Effet de l'anthropisation sur « l'aérosol atmosphérique »

Les aérosols jouent un rôle sur le changement climatique puisqu'ils diffusent et/ou absorbent les rayonnements, et qu'ils interagissent de plus avec les nuages. La nature et

la concentration des aérosols, dont la documentation n'est que récente (la mesure des aérosols a débuté vers la fin des années 1960 avec l'apparition des pluies acides), a certainement évolué depuis la période préindustrielle en réponse aux activités humaines. Les concentrations actuelles en aérosols au-dessus de l'Europe sont résumées sur la **Figure 18**. On observe que

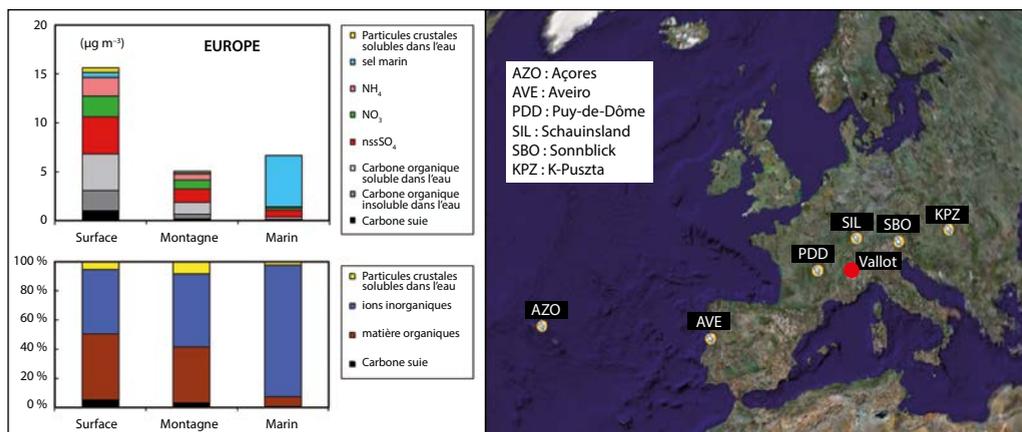


Figure 18

La répartition des aérosols en Europe (voir les différents sites étudiés à droite) de nos jours atteste qu'il existe la même quantité d'aérosols organiques qu'inorganiques dans l'atmosphère européenne. À droite, les sites étudiés en Europe par le programme CARBOSOL (projet européen coordonné par M. Legrand, du Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement, LGGE, CNRS/Université de Grenoble 1).

la partie inorganique est à peu près équivalente à la partie organique de l'aérosol. Mais comment ces deux parties ont évolué au cours du passé ?

Une mission d'étude du Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (LGGE) au Col du Dôme (Figure 19) s'est intéressée à l'effet de l'anthropisation sur la nature et les concentrations des aérosols (ce qu'on appelle « l'aérosol atmosphérique ») en étudiant les années de 1905 à 2005 au moyen des carottages de glace.

La Figure 20A montre l'évolution du sulfate observée dans les couches d'été dans les Alpes. Elle indique une augmentation, qui s'accélère à partir de 1960, passe par un maximum en 1980, et s'inverse brutalement pour permettre aux teneurs de revenir en 2005 à des valeurs aussi basses qu'il y a soixante ans. Comme on le voit sur la Figure 20B (courbe en vert), les modèles de chimie et transport régionaux (ici le modèle EMEP dédié à l'étude de la pollution en Europe)

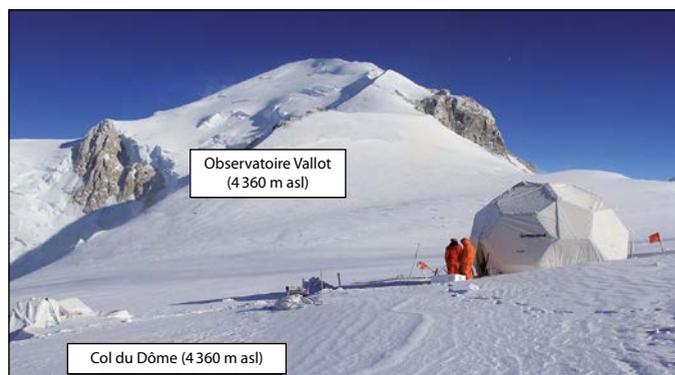


Figure 19

Le site de forage de glace du Col du Dôme situé sous le sommet du Mont Blanc.

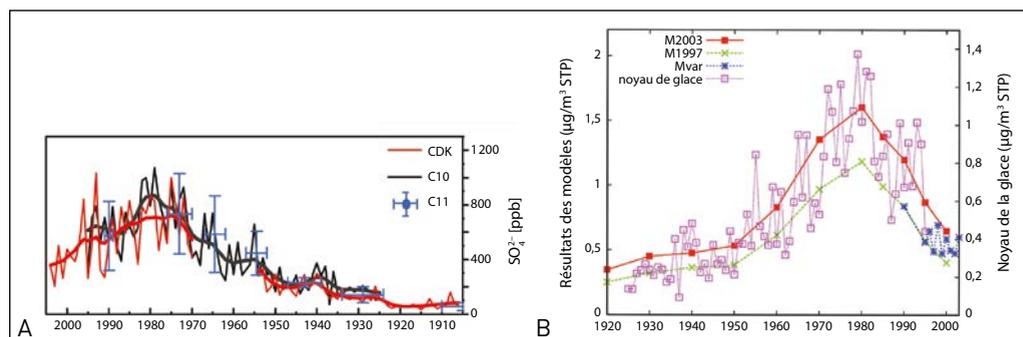


Figure 20

A) Évolution de la concentration en sulfate dans les couches d'été dans les Alpes de 1910 à 2005 ;
 B) comparaison des variations de sulfate observées dans la glace avec celles prédites par les modèles.
 Les différentes simulations (M2003, M1997, Mvar) indiquent la sensibilité des simulations à la variabilité du transport atmosphérique d'une année sur l'autre.

reproduisent très bien les tendances observées dans la glace (en violet). Les émissions anthropiques de SO_2 , dominées par les secteurs énergie (production d'électricité et raffinage du pétrole), décroissent fortement après 1980 suite à la mise en place de programmes électro-nucléaires, aux économies d'énergie après le choc pétrolier de 1973, de la désulfuration des carburants et du traitement des rejets. La pollution au soufre et son rôle sur l'aérosol, qui est un acteur climatique important avec un effet refroidisseur, est donc assez bien comprise.

3.2. L'aérosol organique : sources anthropiques, sources naturelles ?

Les modèles, comme nous venons de le voir, reproduisent bien les concentrations de sulfate ; ils sont cependant complètement en défaut pour l'aérosol organique (Figure 21).

3.3. Mesure des aérosols organiques

Pour reconstruire l'histoire de l'aérosol organique, il nous faut mesurer la teneur en carbone organique dissous (le DOC) de la glace. Si sa mesure est assez facile, on oxyde la matière organique en CO_2 , que l'on quantifie par mesure infrarouge ; la difficulté est ici de ne pas contaminer l'échantillon de glace. En effet, cette mesure est rendue très difficile par le caractère très faible des quantités présentes dans la glace qui sont donc très facilement perturbées par la contamination due au laboratoire, ne serait-ce que par l'air ambiant (Figure 22).

Résultats et interprétation

La Figure 23 montre les variations, entre les années 1920 et 1990, de l'aérosol organique total (en noir), qui augmente au cours du temps d'un facteur trois. Cet aérosol organique contient des milliers d'espèces organiques diffé-

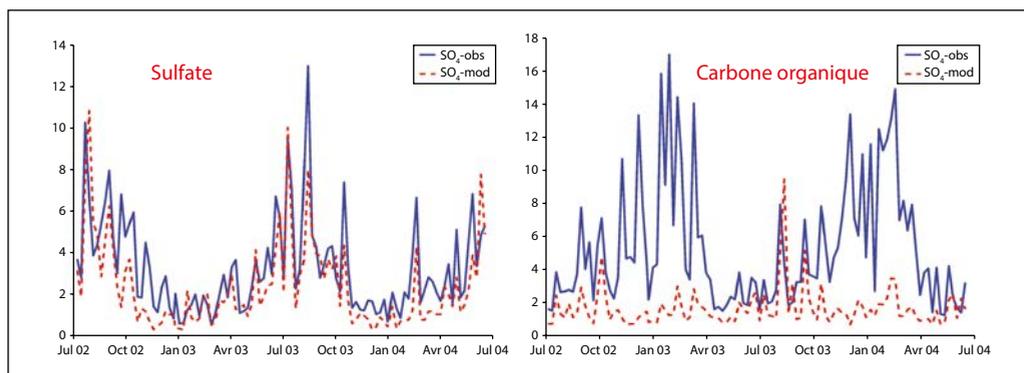


Figure 21

Comparaison entre observations et simulations des modèles pour le sulfate (à gauche) et l'aérosol organique (à droite) pour l'atmosphère actuelle en Europe (surface Europe ; Aveiro, Portugal). Contrairement au sulfate, les modèles ont déjà beaucoup de mal à simuler cette fraction organique pour l'atmosphère actuelle.



Figure 22

Mesure du carbone organique dissout dans la glace : A) oxydation UV en présence d'oxygène/détection NDIR CO_2 ; B) premier rinçage à l'eau ultra-pure ; C) deuxième rinçage sous surpression d'azote.

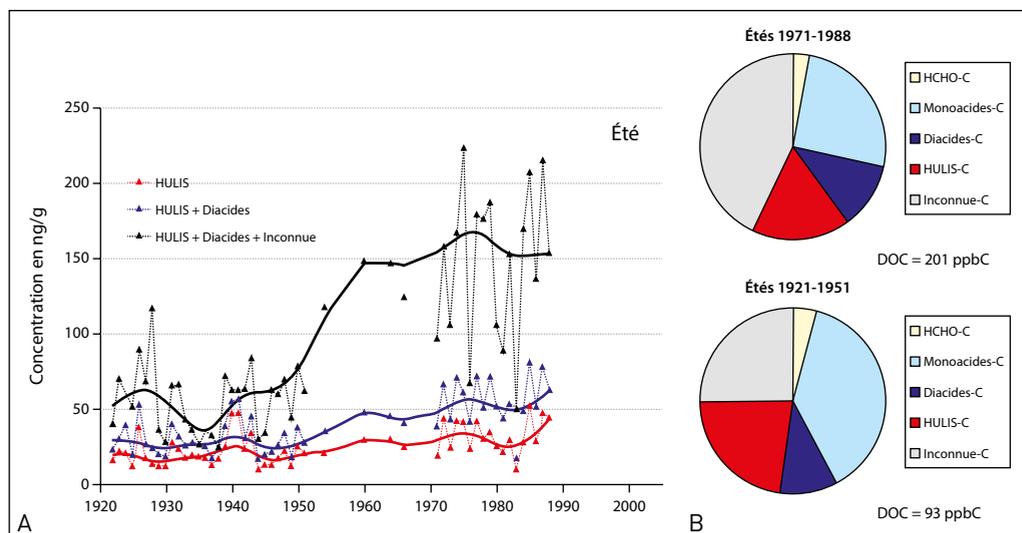


Figure 23

A) Évolution de l'aérosol organique en fonction du temps dans les couches d'été dans les Alpes : en noir la fraction totale, en bleu et rouge les fractions qui ont pu être chimiquement identifiées ; B) spéciation chimique du carbone organique dissout (DOC ; ppbC = parties par milliard de carbone). Les HULIS représentent un groupe de substances chimiques (des polyacides) de structures voisines de celles des acides humiques.

rentes, et seules certaines d'entre elles ont pu être chimiquement identifiées (en bleu et rouge). À ce stade, la cause des tendances observées reste difficile à discuter plus avant car l'essentiel de l'augmentation est dû à une fraction chimiquement non

identifiée. Nous avons alors eu l'idée de mesurer le ^{14}C du DOC de la glace (Figure 24).

Il convient ici de se rappeler qu'il n'y a plus de ^{14}C dans les combustibles fossiles, et que la teneur en ^{14}C de l'atmosphère moderne a doublé suite aux tests nucléaires post-

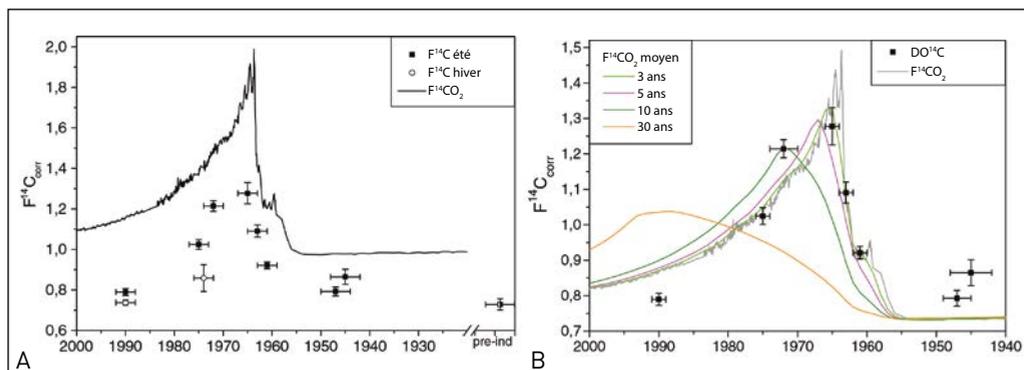


Figure 24

A) Évolution des teneurs en carbone 14 du DOC présent dans la glace du Mont Blanc (notée $F^{14}C$ et représentée par des barres et des croix) comparée à celle du gaz carbonique atmosphérique (notée $F^{14}CO_2$ représentée par la courbe continue) ; B) les 4 courbes en couleur correspondent à l'évolution que l'on aurait dû mesurer si le DOC provenait de la combustion d'arbres de 3 ans, 5 ans, 10 ans, ou 30 ans.

1955. Comme on le voit ici, la fraction de ^{14}C du DOC de la glace en été n'évolue guère entre 1945 et les années 1990 (Figure 24), et suggèrent que 75 % du carbone est d'origine biogénique contre 25 % provenant des combustions fossiles. C'est une surprise car nous venons de le voir, les teneurs en DOC augmentent d'un facteur trois malgré la dominance d'une source biogénique. Si l'on regarde attentivement l'évolution du $DO^{14}C$ glace et celle du $^{14}CO_2$ de l'air, on observe de plus que les variations ont été en phase, ce qui signifie que la biosphère vivante (c'est-à-dire la végétation) est la source majeure de DOC. L'autre source biogénique, les feux de forêt, aurait donné une réponse décalée dans le temps car les troncs d'arbres ont intégré sur plusieurs décennies la perturbation en ^{14}C .

Parmi les causes possibles de cette augmentation des émissions de carbone biogénique,

on peut citer l'augmentation des surfaces boisées (40 % en France depuis 1950), les augmentations de la température et de CO_2 qui stimule les émissions par la végétation, ou encore l'augmentation de l'ozone O_3 qui favorise la conversion des composés organiques volatils en aérosol.

Pour aller plus loin dans l'identification de l'origine des aérosols organiques et ainsi mieux prévoir leur évolution dans le futur, il est nécessaire d'approfondir la chimie organique dans la glace. À titre d'exemple, la Figure 25 liste, à gauche, des molécules traceurs de combustion, à droite des précurseurs biogéniques émis par la végétation (le Lévo-glucosan est un sucre formé durant les combustions de biomasse) et au milieu, des substances à poids moléculaires très élevés, dont on sait qu'elles sont abondantes dans l'atmosphère mais dont les origines et modes de formation

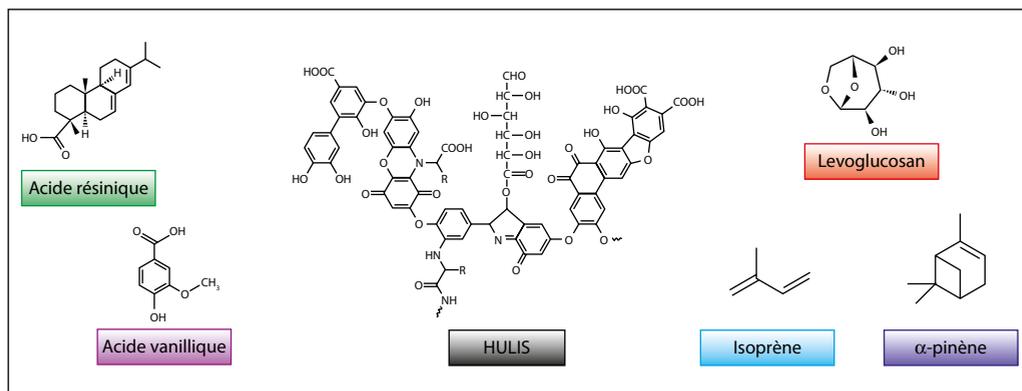


Figure 25

Quelques exemples de molécules organiques constituant l'aérosol organique ou en étant un précurseur gazeux (isoprène et α -pinène).

HULIS : polyacides de structures voisines de celles des acides humiques.

restent mal connus. Tant que ces questions ne seront pas plus avancées, les modèles ne seront pas capables de générer correctement cet aérosol organique.

La chimie, un allié pour connaître les climats du passé

L'étude des carottages de glace fournit des échantillons qui peuvent avoir jusqu'à 800 000 ans d'ancienneté. Les analyses de la glace elle-même (composition en isotopes d'hydrogène et d'oxygène) indiquent la variation des températures de la Terre au cours de cette période. L'analyse des gaz occlus (bulles d'air) permet de reconstruire et d'atteindre les concentrations passées en gaz à effet de serre. L'analyse de la composition chimique de la glace renseigne sur l'évolution passée de la charge et de la composition de l'aérosol atmosphérique.

Sur ce dernier point, l'étude plus poussée de composés organiques serait une aide utile pour mieux appréhender l'évolution de l'aérosol organique, qui joue un rôle important tant sur le climat que sur la qualité de l'air.

La hausse du niveau de la mer : observations et projections

Anny Cazenave est chercheur au Laboratoire d'Études en Géophysique et Océanographie Spatiales (LEGOS¹) à Toulouse et directeur pour les sciences de la Terre à l'International Space Science Institute à Berne. Elle est membre de l'Académie des Sciences.

Le niveau de la mer et ses variations constituent un excellent indicateur du changement climatique. En effet le niveau de la mer intègre les variations de plusieurs composantes du système climatique en réponse au réchauffement d'origine anthropique et à la variabilité naturelle et interne du climat. Depuis quelques décennies, la Terre est en état de déséquilibre énergétique : elle réémet moins d'énergie vers l'espace qu'elle n'en reçoit du Soleil. C'est une des conséquences majeures de l'accumulation de gaz à effet de serre dans l'atmosphère terrestre, résultat de l'utilisation des combustibles fossiles par les activités humaines. L'excès d'énergie – essentiellement sous forme de chaleur – s'accumule majoritairement dans l'océan, à hauteur de 93 % en

moyenne sur les cinquante dernières années. Les 7 % restants servent à réchauffer l'atmosphère et les surfaces continentales, et à faire fondre les glaces (banquise, glaciers et calottes polaires). L'augmentation du contenu en chaleur de l'océan (**Figure 1**) ainsi que la fonte des glaces continentales (glaciers et calottes polaires, **Figure 2**) contribuent à leur tour à la hausse du niveau moyen des océans observée depuis un peu plus d'un siècle.

L'observation directe des variations du niveau de la mer a débuté peu après le début de l'ère industrielle avec l'installation systématique de marégraphes dans quelques ports de l'Europe du Nord, puis progressivement dans d'autres régions du globe. Bien que peu nombreux et mal répartis sur la planète, les séries marégraphiques « historiques » nous indiquent que depuis le

1. www.legos.obs-mip.fr

Figure 1

Évolution du contenu thermique de l'océan depuis 1980 estimé à partir de mesures de températures in situ, jusqu'à 700 m de profondeur (courbe bleue), jusqu'à 2 000 m de profondeur (courbe rouge).

Source : d'après Abraham et coll. (2013).

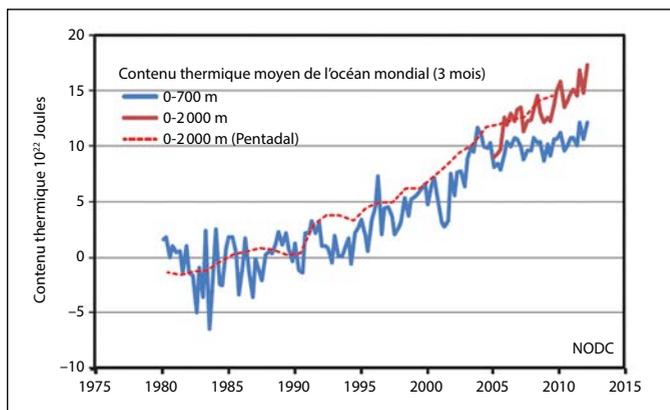
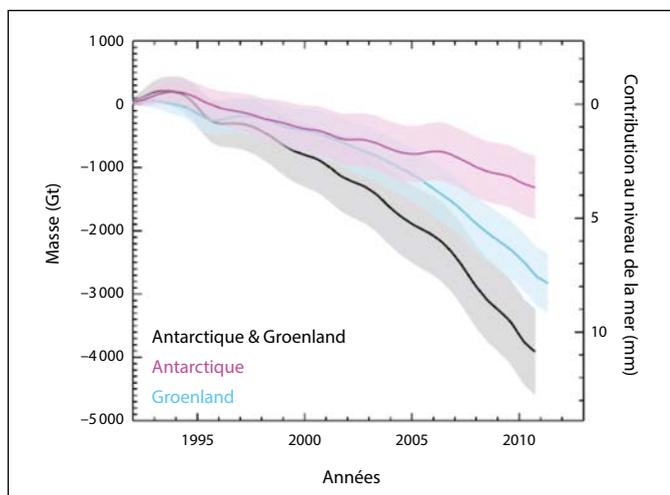


Figure 2

Perte de masse de glace (en milliards de tonnes par an) du Groenland (courbe bleue) et de l'Antarctique (courbe rose). La courbe noire est la somme des deux effets.

Source : d'après Shepherd et coll. (2012).



début du xx^e siècle, la mer est montée globalement à une vitesse moyenne de l'ordre de 1,7 mm par an (Figure 3).

Depuis le début des années 1990, on mesure en routine la hausse de la mer depuis l'espace, grâce aux satellites altimétriques de haute précision, tels que Topex/Poseidon et ses successeurs Jason-1, Jason-2 et Jason-3, ainsi qu'ERS-1/2 et Envisat, et depuis peu SARAL/Altika et Cryosat et Sentinel-3. On dispose aujourd'hui d'une série d'observations depuis

l'espace longue d'environ vingt-cinq ans (Figure 4). Celle-ci montre que le niveau moyen de la mer s'est élevé à la vitesse de 3,4 mm par an entre 1993 et 2016. Bien que la série altimétrique soit encore un peu courte, on ne peut exclure que la hausse de la mer s'est accélérée au cours des deux dernières décennies. L'accord avec les données marégraphiques suggère qu'il s'agit d'un phénomène réel et non d'un biais lié à l'utilisation d'un nouveau système d'observation.

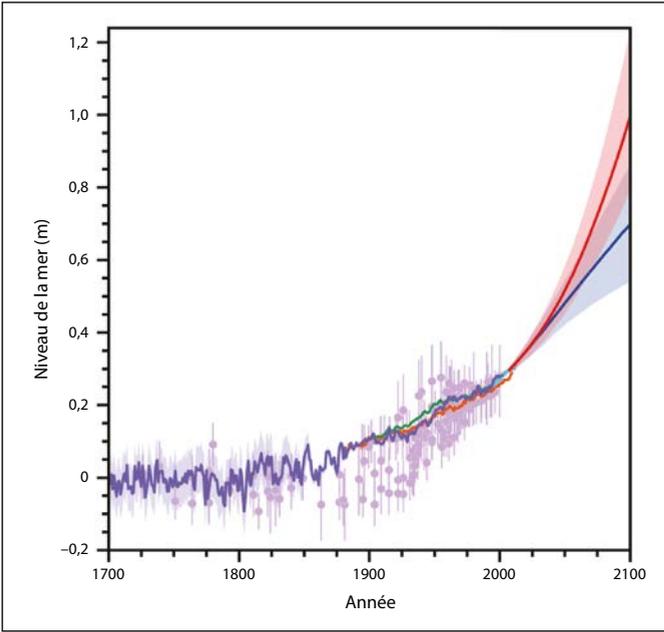


Figure 3

Évolution du niveau moyen global de la mer depuis 1700 estimée à partir des mesures marégraphiques puis altimétriques.

Source : d'après IPCC, 2013 (GIEC).

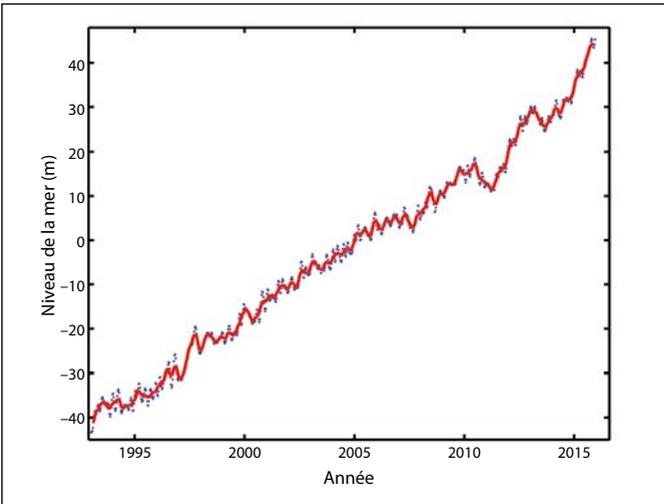


Figure 4

Évolution du niveau moyen global de la mer mesuré par altimétrie spatiale entre janvier 1993 et décembre 2015.

Source : LEGOS.

Grâce à leur couverture quasi globale du domaine océanique, les satellites altimétriques ont aussi révélé que la hausse du niveau de la mer présente d'importantes disparités régionales. Dans certaines régions, tel le Pacifique tropical ouest, la hausse de

la mer a atteint 12 mm/an depuis 1993, soit une élévation trois fois plus grande que la moyenne globale (Figure 5).

Les deux contributions principales de la hausse moyenne globale de la mer sont le réchauffement de l'océan (qui se dilate) et la fonte des glaciers

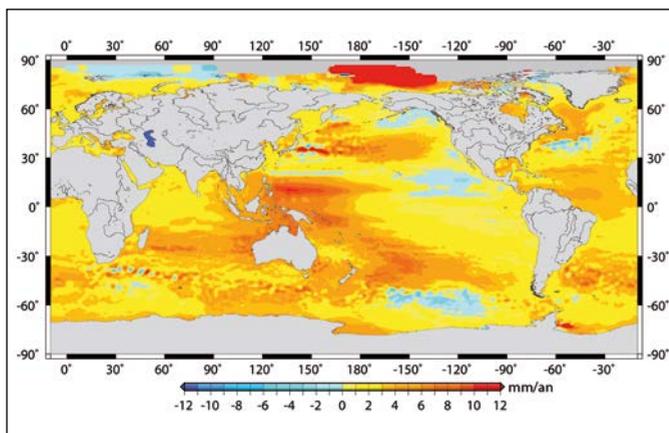


Figure 5

Distribution régionale des vitesses de variation du niveau de la mer entre janvier 1993 et décembre 2014, d'après les observations d'altimétrie spatiale.

Source : LEGOS.

continentaux et des calottes polaires. Les échanges d'eau avec les terres émergées participent aussi aux variations du moyen global de la mer. Aux échelles régionales, l'expansion thermique non uniforme des océans est la cause majeure des disparités régionales de la hausse de la mer. Mais les déformations de la Terre solide dues aux redistributions de masse liées à la fonte passée et actuelle des glaces ont également un impact sur les variations régionales du niveau de la mer.

Depuis plusieurs années, on dispose de divers systèmes d'observation spatiaux et *in situ* permettant d'estimer à la fois les variations globales et régionales du niveau de la mer (l'altimétrie spatiale de haute précision et la marégraphie) ainsi que les principales contributions à ces variations : le système Argo pour la mesure des variations de température et de salinité de la mer ; la gravimétrie spatiale GRACE

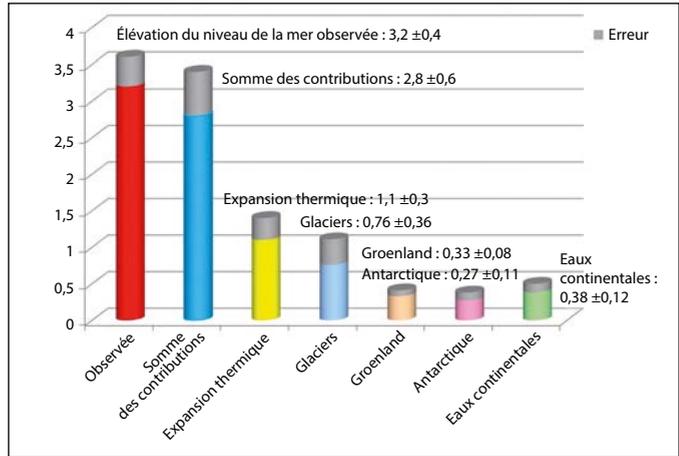
pour estimer les variations de masse de l'océan et des stocks d'eaux continentales ; l'altimétrie laser et radar, GRACE et l'interférométrie radar pour quantifier le bilan de masse des calottes polaires ; l'imagerie spatiale haute résolution et des mesures de terrain pour estimer la fonte des glaciers (même si le bilan de masse des glaciers reste encore principalement basée sur les mesures *in situ*). Utilisées conjointement avec la modélisation, ces observations permettent d'étudier le « bilan » du niveau de la mer aux échelles globale et régionale, et donc de mieux comprendre les processus en jeu. Par ailleurs, ces observations contribuent à la validation et à l'amélioration des modèles climatiques utilisés pour simuler les variations de la mer dans le futur, et en particulier dans les régions côtières.

On estime que l'ensemble des glaces continentales – glaciers et calottes polaires – ont

contribué pour environ 45 % à la hausse observée du niveau de la mer sur la période 1993-2010². Les mesures de température de la mer réalisées à différentes profondeurs à partir de bateaux au cours des dernières décennies, et depuis dix ans par les flotteurs automatiques du projet international Argo (assurant une couverture quasi globale des océans), ont permis d'estimer le réchauffement de l'océan et donc la contribution de la dilatation thermique à la hausse de la mer. Celle-ci a contribué pour environ 35 % à la hausse de la mer sur la période 1993-2010. Les 15 % restants sont attribués à une diminution des stocks d'eau sur les continents, principalement à cause du pompage de l'eau dans les nappes souterraines pour l'irrigation des cultures. La

Figure 6 illustre les différentes contributions à la hausse de la mer sur la période 1993-2010. Depuis 2002-2003, grâce à la mission de gravimétrie spatiale GRACE, on peut mesurer directement la variation de masse de l'océan (sans avoir besoin d'estimer individuellement les différentes compo-

2. Church J.A., Clark P.U., Cazenave A., Gregory J.M., Jevrejeva S., Levermann A., Merrifield M.A., Milne G.A., Nerem R.S., Nunn P.D., Payne A.J., Pfeffer W.T., Stammer D., Unnikrishnan A.S., Sea level change, in: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2013.



santes – glaciers, Groenland, Antarctique, eaux terrestres). Ceci est illustré par la **Figure 7** montrant la hausse de la mer et les contributions de l'expansion thermique (estimée par Argo) et de la masse de l'océan.

Figure 6

Bilan du niveau de la mer pour la période 1993-2010 ; comparaison de la hausse observée avec la somme des contributions (en mm/an).

Source : d'après Church et coll. (2013).

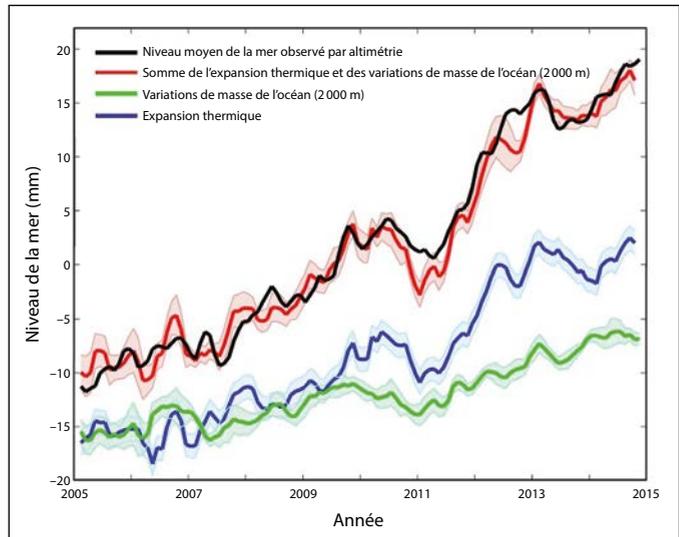


Figure 7

Bilan du niveau de la mer pour la période 2003-2013 ; comparaison entre niveau de la mer observé par altimétrie spatiale et contributions de l'expansion thermique (d'après Argo) et de la masse de l'océan (d'après GRACE).

Source : LEGOS et Dieng et coll. (2015).

À l'échelle régionale, comme mentionné plus haut, la cause principale de la variabilité observée résulte de l'expansion thermique non uniforme de l'océan : dans certaines régions, il y a plus de chaleur stockée dans l'océan donc plus de dilatation. Il en résulte une hausse de la mer non uniforme. Les tendances régionales du niveau de la mer observées par altimétrie satellitaire et celles résultant de l'expansion thermique de l'océan montrent un accord remarquable.

Avec la poursuite du réchauffement climatique en réponse aux émissions passées et futures de gaz à effet de serre, la hausse du niveau marin va se poursuivre au cours des prochaines décennies, et même des prochains siècles. Comme c'est le cas aujourd'hui, les deux contri-

butions principales sont la fonte des glaces continentales et l'expansion thermique des océans. Les estimations de la hausse future de la mer sont basées sur des simulations numériques modélisant les différents processus. Dans le 5^e rapport du GIEC, les projections futures des différentes variables climatiques sont fournies pour plusieurs scénarios de réchauffement futur exprimés en termes de forçage radiatif net (appelés RCP/'Radiative Concentration Pathway').

Pour le scénario RCP8.5 (extrapolation du taux actuel d'émissions de gaz à effet de serre), les projections pour 2100 indiquent une élévation moyenne globale de la mer de l'ordre de 75 ± 25 cm (Figure 8). L'expansion thermique de l'océan devrait représenter 30 à 55 % de la hausse de la

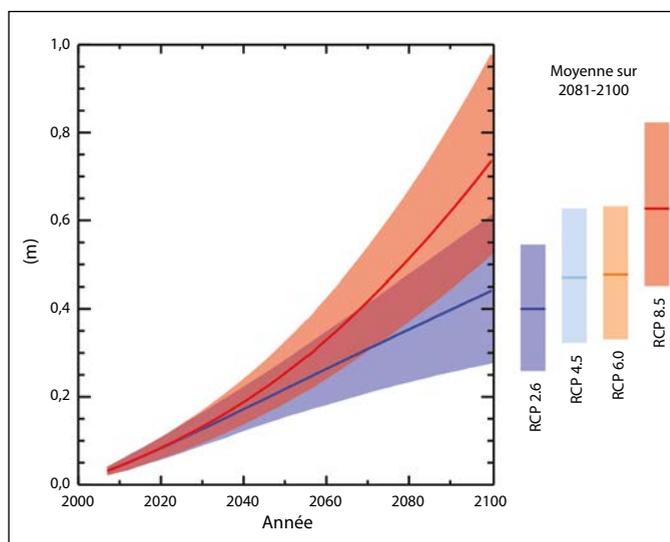


Figure 8

Projections de la hausse future du niveau moyen global de la mer au cours du XXI^e siècle pour deux scénarios de réchauffement (RCP 2.6 et RCP 8.5).

Source : d'après Church et coll. (2013).

mer. La fonte des glaciers de montagne représente la deuxième contribution la plus importante et se situe entre 15 et 35 %. Les contributions du Groenland et de l'Antarctique comprennent à la fois celles qui sont liées au bilan net de la fonte et de l'accumulation de la glace ou de la neige à la surface des calottes, et celles liées à l'écoulement de la glace vers l'océan.

Comme c'est déjà le cas aujourd'hui, l'élévation future de la mer présentera d'importantes variations régionales (Figure 9). Celles-ci résultent de différents facteurs. L'effet dominant est dû à la distribution non uniforme de la température de l'océan et de la salinité (en lien avec la fonte de la banquise et des glaces continentales, et les variations du cycle hydrologique). Les variations géographiques de la pression atmosphérique jouent aussi un rôle, mais faible en comparaison de la température de la mer et de la salinité. La fonte actuelle (et future) des glaces continentales (glaciers de montagne et calottes polaires) génère aussi de manière indirecte une part de la variabilité régionale du niveau de la mer : sous l'effet des redistributions de masse de glace et d'eau, la croûte terrestre (élastique) se déforme, ce qui modifie légèrement le contour et la profondeur des bassins océaniques, donc le niveau de la mer à l'échelle régionale. De plus, la Terre continue de se déformer de façon viscoélastique en réponse à la dernière déglaciation (phénomène appelé « rebond post-glaciaire »), ce qui induit une

autre contribution à la variabilité régionale de la mer. On estime que la fonte future des calottes polaires causera une amplification de l'élévation de la mer dans les océans tropicaux de 20 % à 30 % par rapport à la hausse moyenne globale. Le phénomène de rebond post-glaciaire a quant à lui des effets importants dans les régions des hautes latitudes. Le long de la côte Est de l'Amérique du Nord, l'effet du rebond post-glaciaire combiné au ralentissement de la circulation thermohaline induite par les changements de la dynamique océanique, la hausse (relative) de la mer devrait être très supérieure à la moyenne globale (voir la Figure 9).

Les conséquences de la hausse future de la mer dans les régions côtières sont multiples : submersions temporaires et inondations permanentes, érosion du littoral, salinisation des aquifères, disparition des zones humides, etc. Si la hausse de la mer causée par le réchauffement climatique

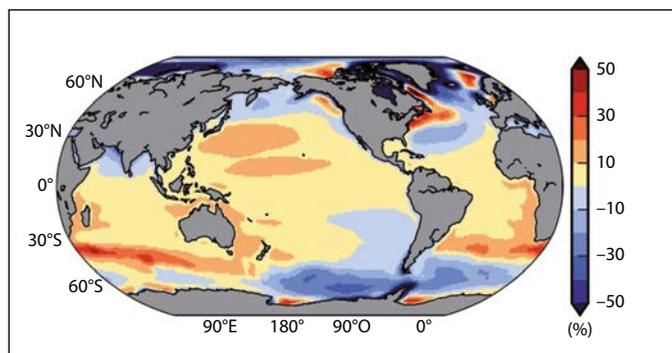


Figure 9

Écarts à la hausse moyenne globale, exprimés en % (vables pour tous les scénarios de réchauffement).

Source : d'après Church et coll. [2013].

global reste un phénomène lent, il est néanmoins inexorable et à très longue durée de vie (même si les émissions de gaz à effet de serre s'arrêtaient immédiatement, la mer continuerait à monter pendant plusieurs siècles en raison de la très grande inertie thermique de l'océan et de la longue durée de vie du dioxyde de carbone dans l'atmosphère). Avec les événements extrêmes et les ressources en eau, la hausse du niveau de la mer est un des phénomènes les plus préoccupants causés par les changements

globaux affectant la planète. Assurer la continuité des observations spatiales et *in situ* de façon à disposer de séries longues et précises des paramètres climatiques, améliorer les projections de la hausse future de la mer aux échelles globale, régionale et locale, et amplifier les recherches sur les impacts côtiers de la hausse du niveau marin tenant compte de la complexité des systèmes littoraux, constituent plusieurs défis majeurs pour la communauté scientifique internationale impliquée dans cette thématique.

Références citées

– Abraham J.P., Baringer M., Bindoff N.L., Boyer T., Cheng L.J., Church J.A., Conroy J.L., Domingues C.M., Fasullo J.T., Gilson J., Goni G., Good S.A., Gorman J.M., Gouretski V., Ishii M., Johnson G.C., Kizu S., Lyman J.M., Macdonald A.M., Minkowycz W.J., Moffitt S. E., Palmer M.D., Piola A.R., Reseghetti F., Schuckmann K., Trenberth K.E., Velicogna I., Willis J.K. (2013). A review of global ocean temperature observations: implications for ocean heat content estimates and climate change, *Rev. Geophys.*, 51 : 450-483.

– Church J.A., Clark P.U., Cazenave A., Gregory J.M.,

Jevrejeva S., Levermann A., Merrifield M.A., Milne G.A., Nerem R.S., Nunn P.D., Payne A.J., Pfeffer W.T., Stammer D., Unnikrishnan A.S., Sea level change, in: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2013.

– Dieng H., Palanisamy H., Cazenave A., Meyssignac B. and von Schuckmann K. (2015). The sea level budget since 2003:

inference on the deep ocean heat content, *Surveys in Geophysics*, 36 : 1.

– IPCC, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by: Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M., Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2013.

– Shepherd A *et coll.* (2012). A reconciled estimate of ice sheet mass balance, 338 : 1183, *Science*.

Pour en savoir plus :

– Cazenave A., Le Cozannet G. (2014). Sea level rise and coastal impacts, *Earth's Future*, 2 : 15-34.

– Cazenave A., Berthier E., LeCozannet G., Masson-

Delmotte V., Meyssignac B., Salas y Melia D. (2015). Le niveau de la mer : variations passées, présentes et futures, *Journal La Météorologie*, vol 8.

– Stammer D., Cazenave A., Ponte R., Tamisiea M. (2013).

Contemporary regional sea level changes, *Annual Review Marine Sciences*, 5 : 21-46.

Chimie atmosphérique et climat

Guy Brasseur a dirigé l'Institut Max Planck de météorologie¹ (Hambourg, Allemagne), et a fait partie du National Center for Atmospheric Research (Boulder, CO, États-Unis).

La chimie atmosphérique fait intervenir des processus complexes, et son impact sur le climat est difficile à quantifier. Son rôle s'ajoute à celui du CO₂ et à celui de l'activité solaire. À longue échéance, cependant, c'est le CO₂ qui déterminera principalement la réponse du système climatique à l'activité humaine.

1 La composition atmosphérique de la Terre

Il faut d'abord rappeler que la composition de l'atmosphère terrestre a évolué depuis la formation de la planète il y a plus de 4 milliards d'années. La **Figure 1** montre que l'oxygène n'est apparu que relativement récemment, et qu'au cours du temps, il y a eu des variations importantes de la composition de l'atmo-

sphère, qui est aujourd'hui essentiellement constituée d'azote, d'oxygène et d'un grand nombre de composés mineurs. On pourrait penser que ces derniers n'ont qu'une importance très secondaire, mais, en réalité, ils jouent un rôle important à la fois pour la chimie de l'atmosphère et la qualité de l'air, mais aussi évidemment pour les problèmes climatiques, comme nous le verrons ensuite.

La composition chimique de l'atmosphère et le climat ont évolué de manière coordonnée. La **Figure 2** montre d'une part l'évolution des deux gaz à effet de serre, le CO₂ et le méthane CH₄, et d'autre part l'évolution de la température au cours des 400 000 dernières années. Cette évolution est liée à celle des paramètres orbitaux de la Terre autour du Soleil (voir aussi le **Chapitre de V. Courtillot** dans cet ouvrage *Chimie et changement climatique*, EDP

1. www.mpimet.mpg.de

Figure 1

Évolution chronologique de la composition chimique de l'atmosphère. Sa composition actuelle est : N_2 (78 %), O_2 (21 %), Ar (1 %), CO_2 ($3,8 \cdot 10^{-4}$), CH_4 ($1,6 \cdot 10^{-6}$), H_2 ($5 \cdot 10^{-7}$), N_2O ($3,5 \cdot 10^{-7}$), CO ($7 \cdot 10^{-8}$), H_2O et O_3 variables.

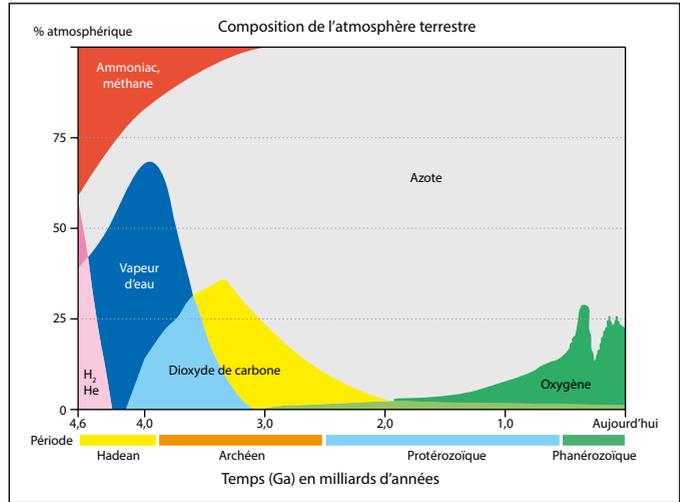
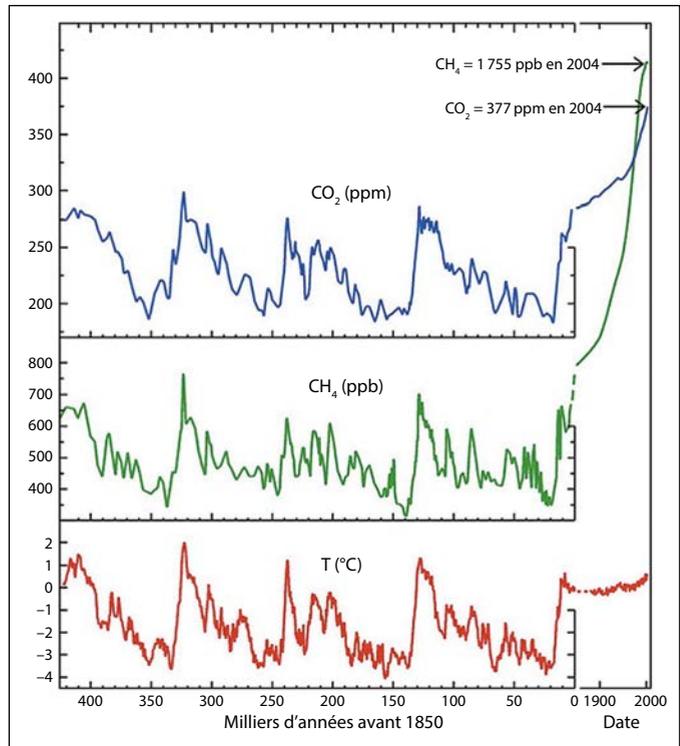


Figure 2

L'analyse des carottes de glace prélevées dans l'Antarctique nous montre que l'évolution passée du climat, liée aux changements des paramètres orbitaux de la Terre autour du Soleil, a été accompagnée de changements dans la composition chimique de l'atmosphère. Aujourd'hui, la planète se trouve dans un état très différent de ce qu'on a connu.



Sciences, 2016), et à des phénomènes d'amplification propres au système terrestre.

Sur la partie droite de la **Figure 2**, un zoom sur l'époque actuelle montre que l'évolution

à la fois du CO_2 et du méthane se situe véritablement en dehors de la zone des fluctuations naturelles que l'on a connues dans ce passé relativement lointain. Aujourd'hui, notre

planète se trouve dans un état qui est très différent de celui qu'on a connu, et la question est de voir quelle sera la réponse à long terme du système terrestre à une telle perturbation.

2 L'atmosphère est un réacteur chimique loin de l'équilibre

En fait, l'atmosphère est un réacteur chimique qui est très loin de l'équilibre parce qu'un certain nombre de forces extérieures l'empêchent d'atteindre cet équilibre (*Figure 3*) :

- l'énergie solaire, qui entretient les réactions photochimiques² de dissociation qui se produisent pendant le jour ;
- la biosphère³, qui produit des émissions de composés réactifs ; par exemple,

2. Réaction photochimique : réaction se produisant grâce à l'énergie lumineuse absorbée.

3. Biosphère : ensemble des écosystèmes de la Terre (organismes vivants et leur milieu de vie), ce qui correspond à une mince couche de l'atmosphère où la vie est présente (20 km maximum au-dessus du sol).

beaucoup d'hydrocarbures sont produits par les forêts, et des quantités importantes d'oxydes d'azote sont produites par les sols. Les concentrations atmosphériques d'oxygène et de CO_2 sont déterminées par des processus liés à la biosphère ;

- l'activité humaine est un phénomène nouveau dans l'histoire de la Terre qui perturbe la composition chimique de l'atmosphère et qui, par ailleurs, introduit des problèmes sur la qualité de l'air.

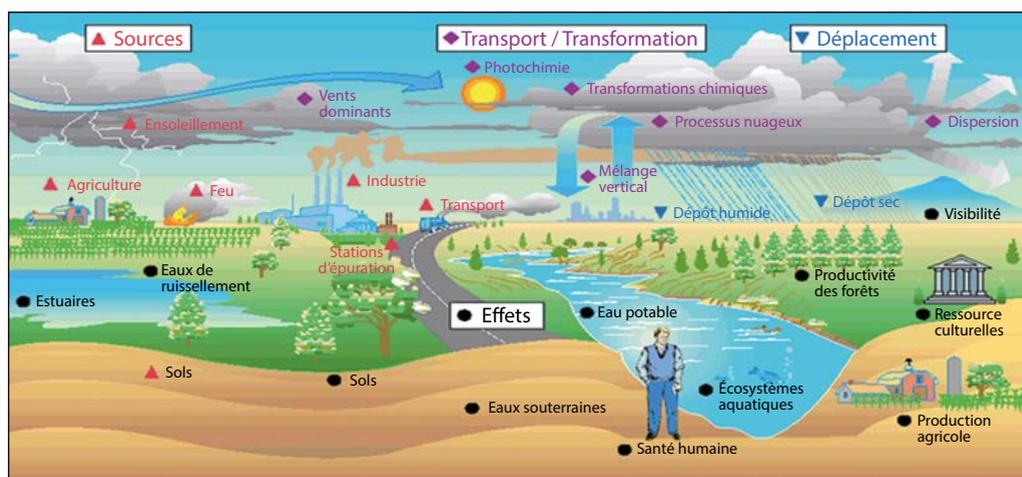
2.1. L'ozone stratosphérique nous protège des radiations UV-visible

L'ozone stratosphérique⁴ O_3 est indispensable à la vie sur Terre car il nous protège du rayonnement solaire ultraviolet. Sa présence résulte d'un équilibre entre sa production par action du rayonne-

4. Stratosphère : deuxième couche de l'atmosphère, située entre une dizaine et une cinquantaine de kilomètres du sol. La couche d'ozone se situe en majeure partie dans la stratosphère.

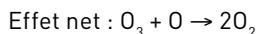
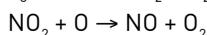
Figure 3

Les forces extérieures agissant sur le réacteur chimique hors équilibre qu'est l'atmosphère.



ment solaire ultra-violet sur l'oxygène moléculaire O_2 , et des réactions de destruction photocatalytiques. Le premier mécanisme de production et de destruction photochimique de l'ozone (Figure 4A) a été introduit par Sydney Chapman en 1930 (Figure 4AB).

L'ozone formé est détruit par un certain nombre de processus photocatalytiques dont le principal fait intervenir l'oxyde d'azote NO :



L'oxyde d'azote provient essentiellement de processus biologiques sous forme de N_2O – qui se décompose dans la stratosphère en oxyde d'azote –, mais aussi de plus en plus d'effets anthropiques ; par exemple, dans les années 1970, on a beaucoup parlé de l'effet possible des émissions d'oxyde d'azote dans la stratosphère par l'aviation supersonique⁵.

D'autres composés comme le chlore peuvent aussi catalyser

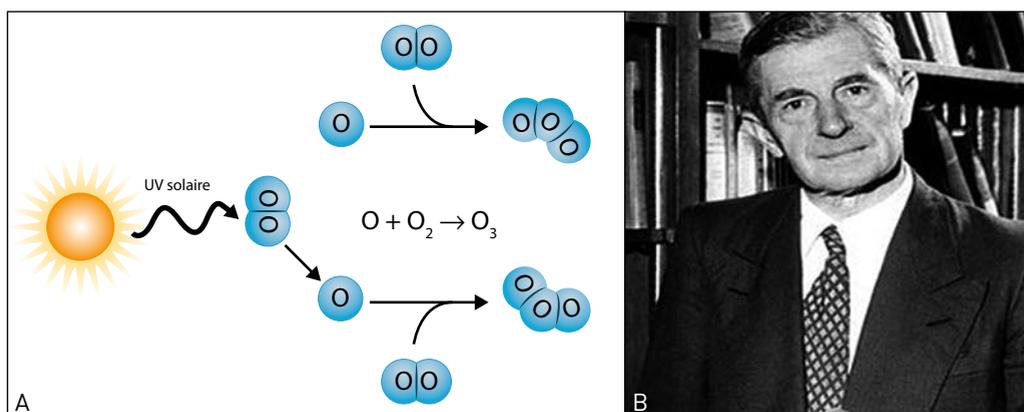
la destruction de l'ozone. Le chlore présent dans la stratosphère est essentiellement d'origine industrielle et a été produit en grande quantité à partir des rejets de chlorofluorocarbures (CFCs) qui ont été dispersés dans l'atmosphère et qui aujourd'hui sont la cause essentielle de la destruction de l'ozone dans les régions polaires de la stratosphère. Le trou d'ozone se produit par des processus complexes qui activent le chlore. Cette activation du chlore se produit sur la surface de cristaux de glace qui constituent les nuages polaires⁶ observés

Figure 4

A) Schéma du mécanisme photochimique de la formation de la couche d'ozone par action du rayonnement solaire ultra-violet sur le dioxygène O_2 . Ce mécanisme a été proposé par l'astronome et géophysicien Sydney Chapman (B).

5. Aviation supersonique : aviation capable de se déplacer à une vitesse supérieure à la vitesse du son.

6. Nuages polaires : nuages se formant dans les régions à une vingtaine de kilomètres d'altitude lorsque l'air y est très froid. Leurs dimensions peuvent atteindre la centaine de kilomètres pour une épaisseur d'un à plusieurs kilomètres et sont constitués de cristaux de glace, ce qui leur donne une apparence nacré, mais aussi parfois d'acide nitrique, ce qui leur donne une couleur orange. Bien qu'aux altitudes concernées l'humidité relative soit très faible, ces nuages se forment progressivement, et les nuages d'acide nitrique jouent un rôle dans la diminution de l'ozone stratosphérique des pôles.



entre 16 et 25 km d'altitude dans ces zones extrêmement froides de l'atmosphère. Dès que le Soleil réapparaît au printemps (septembre) dans la région polaire australe, l'ozone est détruit en quelques semaines par réactions photocatalytiques. La destruction de l'ozone est très prononcée dans l'Antarctique où les températures sont 10 à 20 °C plus basses que dans la stratosphère arctique. Ces basses températures favorisent la formation de nuages de cristaux de glace.

La diminution de l'ozone en Antarctique est visualisée par un véritable « trou » dans la couche d'ozone (**Figure 5A**) pendant le printemps austral. Même si on en parle beaucoup moins qu'il y a une dizaine d'années, le trou d'ozone devrait rester présent jusqu'aux alentours de 2050-2060, c'est-à-dire le temps que le chlore d'origine anthropique disparaisse de la stratosphère. On voit sur la **Figure 5B** que dans ces régions, la quantité d'ozone pendant la période

d'enseillement du printemps austral (juin-septembre) est à peu près réduite de 50 % par rapport à ce qu'elle était avant 1960. C'est un exemple qui met en lumière le rôle important de la chimie atmosphérique.

Des observations par satellites (**Figure 6**) montrent que la formation du trou d'ozone au-dessus du continent antarctique est liée à la présence dans cette région de quantités importantes de monoxyde de chlore ClO. Celui-ci catalyse la destruction de l'ozone de manière très rapide (en quelques semaines) au moment où le Soleil arrive pour permettre à cette réaction photocatalytique de se produire.

La diminution de l'ozone polaire est moins marquée au pôle Nord dont la température stratosphérique est plus élevée qu'au pôle Sud. Il y a donc dans l'hémisphère Nord moins de nuages stratosphériques polaires qui activent le chlore. Mais il peut se produire, comme ce fut le cas en 2011, un hiver stratosphérique très froid dans l'hémisphère

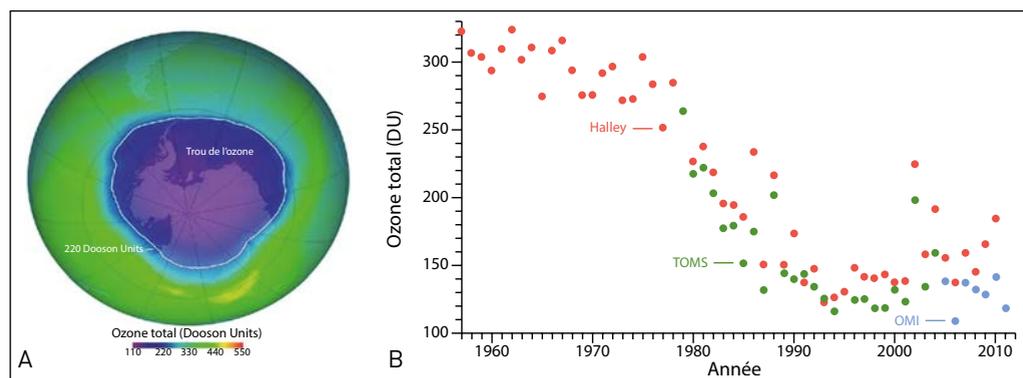
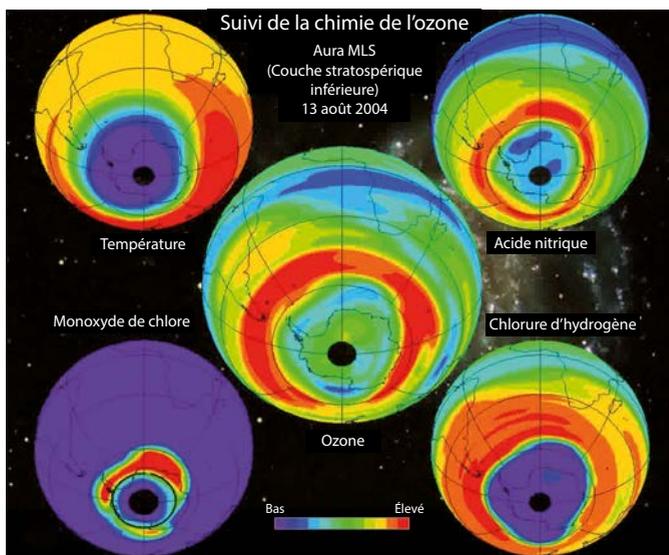


Figure 5

A) Début de la formation du trou d'ozone en 1980 ; B) diminution de la quantité d'ozone en Antarctique durant les cinquante dernières années.

Figure 6

Observations satellites permettant de mettre en évidence l'impact du trou d'ozone sur la température, la concentration en acide nitrique NO , en monoxyde de chlore ClO et en chlorure d'hydrogène HCl dans l'atmosphère.



Nord, pendant lequel ces nuages sont apparus avec pour conséquence une destruction importante de l'ozone. De faibles quantités d'ozone ont été observées cette année-là en Europe du Nord ; par contre, en 2014, cela ne s'est pas produit, comme d'ailleurs la plupart des autres années (Figure 7).

2.2. La formation d'ozone à la surface et la dégradation de la qualité de l'air

Dans les villes, l'ozone à proximité du sol est formé par une série de réactions photochimiques qui font intervenir les oxydes d'azote et différents hydrocarbures. Ceux-ci sont émis en grande

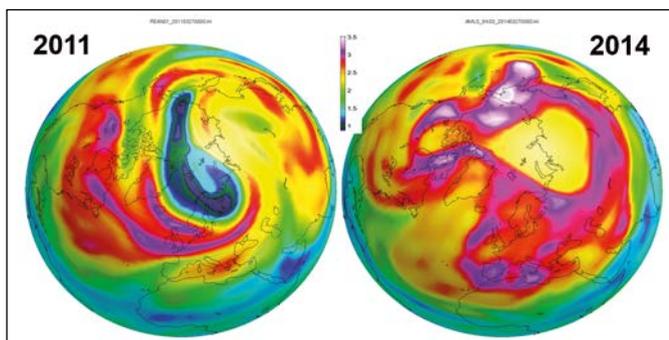


Figure 7

Lien entre la température de l'Arctique, supérieure à celle de l'Antarctique, et l'absence de trou d'ozone en cette région. Analyse des données Aura-MLS par BASCOE dans la stratosphère inférieure ($\theta = 485\text{K}$) en Mars.

Source : Simon Chabrilat, BISA.

partie par l'industrie, les activités domestiques et par les transports (**Figure 8**). Ici on se soucie moins des propriétés absorbantes de l'ozone que de son rôle d'oxydant : l'ozone que l'on respire est à la source de maladies respiratoires et cardiaques. Nous devons donc veiller à nous protéger des épisodes d'ozone qui se produisent de manière régulière pendant l'été dans les régions urbaines.

La modélisation de la qualité de l'air à l'échelle globale nous permet aujourd'hui de simuler la répartition spatiale de l'ozone, et de déterminer comment il se produit, est transporté puis détruit. La **Figure 9** montre la présence de quantités importantes d'ozone dans les zones industrielles (couleurs chaudes) mais aussi dans les zones où l'on brûle de la biomasse, notamment en Afrique. Ce sont dans ces

régions que les précurseurs d'ozone sont émis en grande quantité.

Aujourd'hui, grâce à de tels modèles mathématiques, on peut prévoir quotidiennement les concentrations des polluants à l'échelle globale. La **Figure 10** est un exemple de prévision pour le 18 novembre 2015, faite au centre européen de Reading⁷ pour les oxydes d'azote. Les quantités sont surtout importantes là où les émissions sont élevées, c'est-à-dire dans les zones urbaines, dans les zones industrielles, et très élevées en particulier en Chine. On repère aussi sur les océans les émissions qui résultent

7. Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme basé en Grande Bretagne. Ce centre donne des prévisions de la qualité de l'air pour dix jours. Météo France y participe en tant qu'État membre.

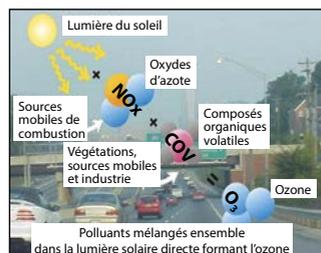


Figure 8

L'ozone O_3 à la surface de la Terre est due aux rejets de l'activité humaine. Dans les villes, l'ozone est formé par réactions photochimiques entre les oxydes d'azote (NOx) et des hydrocarbures ($COVs$) émis par le transport, l'industrie et les activités domestiques.

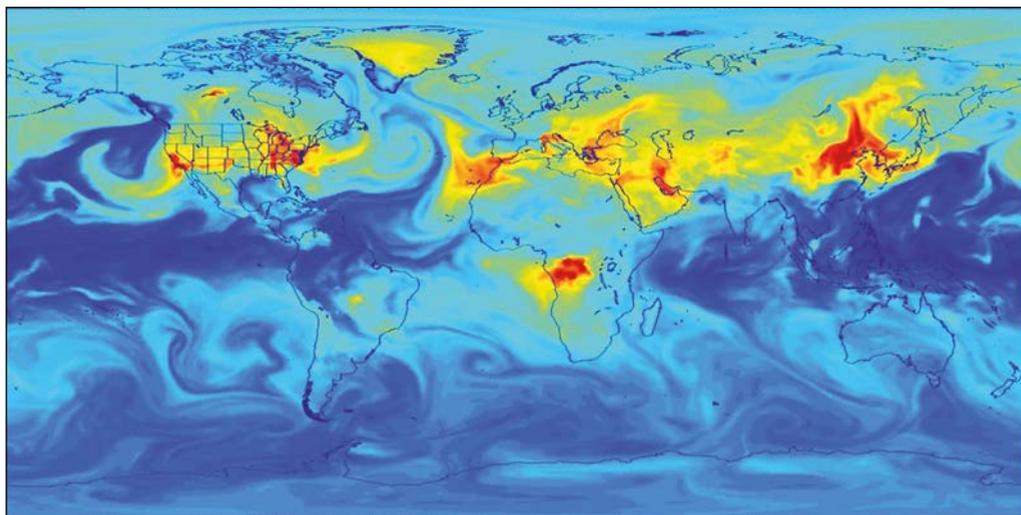


Figure 9

Modèle global de l'ozone à la surface de la Terre mettant en évidence l'impact de l'activité humaine (résolution spatiale de 50 km).

Source : Louisa Emmons, NCAR.

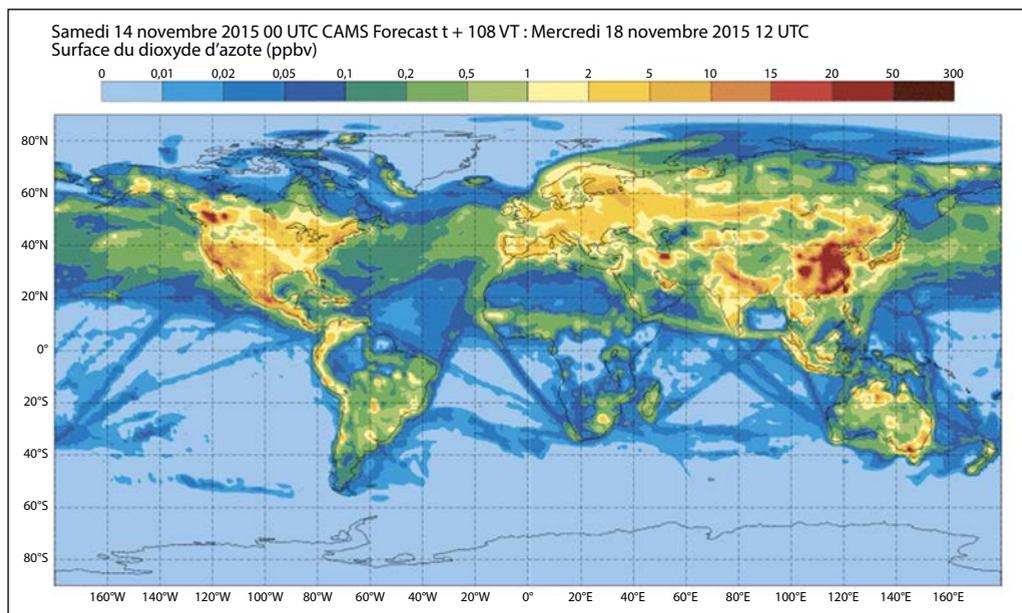


Figure 10

Prévision de la qualité de l'air à l'échelle globale pour le 18 novembre 2015.

des navires qui sont propulsés par des moteurs en général très polluants.

2.3. La formation des aérosols atmosphériques

On définit l'aérosol atmosphérique comme un mélange dynamique de particules solides et liquides en suspension dans l'air. Ces particules proviennent de sources naturelles et anthropiques (liées à l'activité humaine). La **Figure 11** montre combien la pollution de l'air peut être intense, notamment en Chine.

Les aérosols atmosphériques ont un impact direct et indirect sur le climat. L'effet direct résulte d'une interaction entre le rayonnement solaire et les particules atmosphériques. Les fines particules, par exemple les sulfates, diffusent la lumière et réduisent la quantité d'énergie qui atteint le sol. Ils contribuent à

refroidir la planète. D'autres particules comme la suie absorbent le rayonnement et tendent à réchauffer le système terrestre. Différents effets indirects existent aussi et se manifestent par des changements des propriétés optiques ou de la durée de vie des nuages. Les conséquences sur le climat de ces effets indirects restent mal quantifiées. Les sources de particules sont nombreuses (**Figure 12**). Elles peuvent être d'origine industrielle ou liées au transport. Il y a aussi des aérosols qui sont émis par l'océan, c'est le sel marin. De temps à autre des poussières sont transportées des déserts. On observe fréquemment des épisodes pendant lesquels des poussières provenant du Sahara sont transportées vers l'Europe.

La **Figure 13** présente un modèle de répartition globale d'aérosols, sur lequel on peut



Figure 11

Illustration de quelques causes de la dégradation de la qualité de l'air.

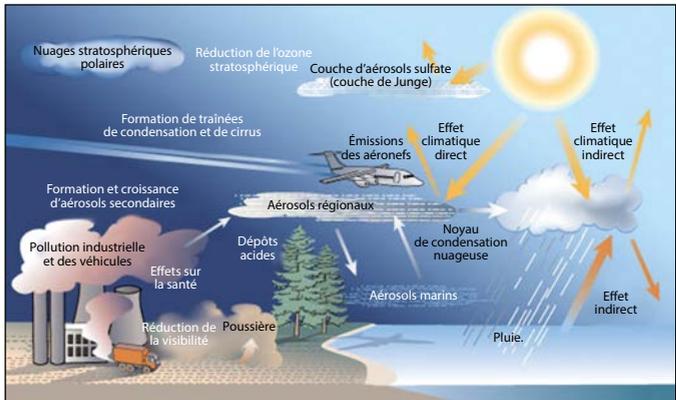


Figure 12

Les émissions d'aérosols ont de multiples sources, humaines ou non, directes ou non.

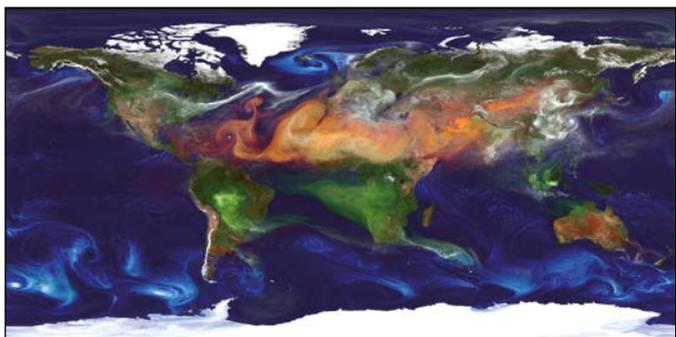


Figure 13

Modèle global des aérosols à la surface de la Terre.
 Jaune : poussière d'origine désertique ; bleu : sels marins ; vert : effet des feux de forêt ; blanc : effet des sulfates.

voir au centre, en jaune, la présence de poussières d'origine désertique ; en bleu sont figurées celle des sels marins ; en vert l'effet des feux de forêts, essentiellement visibles dans les tropiques ; en blanc, l'effet des sulfates résultant notamment de la combustion du charbon. Cette dernière contribution est particulièrement marquée en Chine.

3 La qualité de l'air : un problème majeur pour notre société

On parle beaucoup du climat, qui est un problème très important, mais on oublie parfois que la qualité de l'air est un problème urgent qui touche des populations entières. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé, trois millions de personnes meurent chaque année prématurément à cause de la pollution extérieure, et il faut y ajouter environ trois autres millions de décès dus à la pollution intérieure, surtout dans les pays en développement où l'on fait du cooking⁸. Vivre dans une vallée polluée de la Chine équivaut à fumer quarante cigarettes par jour ! Ces composés réactifs ont un effet important sur le climat qui s'ajoute à celui du CO₂. On sait maintenant faire des prévisions sur la qualité de l'air comme le montrent les quatre différents modèles régionaux européens de la *Figure 14*.

8. Environ la moitié des foyers de la planète fait la cuisine grâce à des combustibles fossiles provenant de la biomasse. Cela entraîne une grave pollution intérieure et donc de nombreuses maladies respiratoires, surtout chez les femmes et les enfants.

3.1. L'impact des gaz réactifs et des aérosols sur le climat

Le courbe rouge de la *Figure 15* montre l'intensité du rayonnement solaire UV-visible qui arrive sur Terre ; la partie en rouge représente la quantité d'énergie qui pénètre effectivement jusqu'au sol, qui représente environ 75 % de l'énergie reçue. Une partie de ce rayonnement (dans l'ultra-violet) est absorbée par l'ozone dans la stratosphère. De même, la courbe bleue représente l'émission par la Terre des rayonnements infrarouges, et la partie bleue l'énergie effectivement émise vers l'espace. Celle-ci ne représente que 15 à 30 % de l'énergie émise au sol. Une partie importante de la radiation infrarouge est absorbée par les gaz à effet de serre dans l'atmosphère, ce qui conduit à un réchauffement de la planète. Sans la présence des gaz à effet de serre, la température de la Terre serait environ 30 °C plus basse que celle qui est observée.

Ce sont donc ces absorptions par des constituants de l'atmosphère, les gaz à effet de serre (CO₂, vapeur d'eau, méthane, ozone), qui vont en grande partie déterminer l'équilibre entre l'énergie qui est absorbée par le système terrestre et celle qui est émise vers l'espace. C'est le forçage radiatif⁹ dont dépend le réchauffement climatique (*Figure 16*).

Les gaz à effet de serre et les espèces chimiques comme l'ozone et les aérosols pro-

9. Forçage radiatif : équilibre entre le rayonnement solaire entrant et les émissions de rayonnements infrarouges sortant de l'atmosphère.

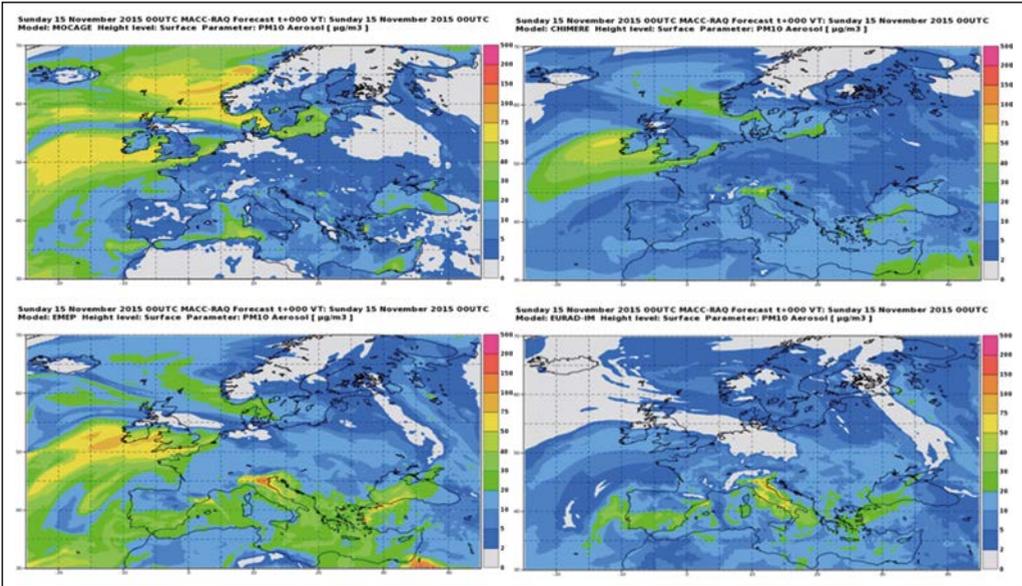


Figure 14

Variation de la prévision de la qualité de l'air en fonction du modèle utilisé (ici, quatre modèles régionaux), à l'échelle régionale en Europe. PM10, le 15 novembre 2015.
PM10 : particules de diamètre inférieur à 10 micromètres.

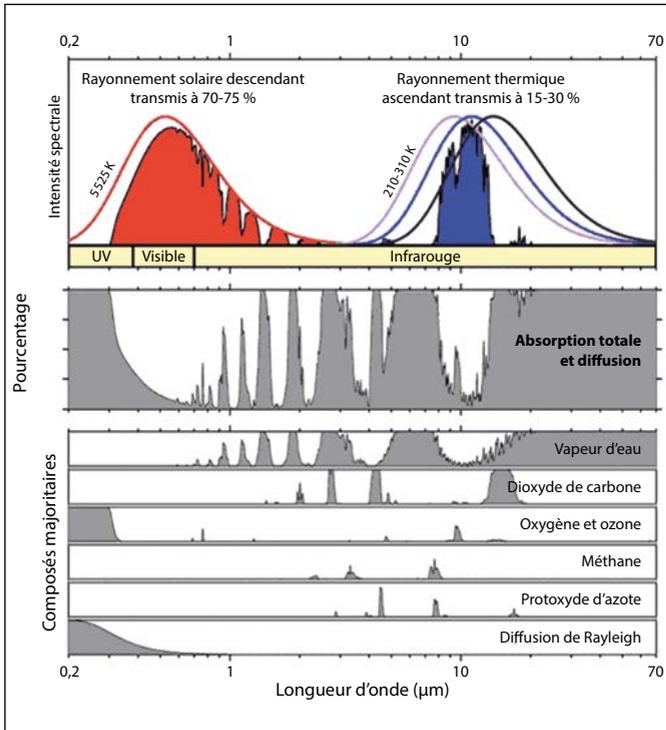


Figure 15

Rayonnement transmis par l'atmosphère : le rayonnement infrarouge émis par la Terre est en partie absorbé par les gaz à effet de serre et les aérosols contenus dans l'atmosphère.

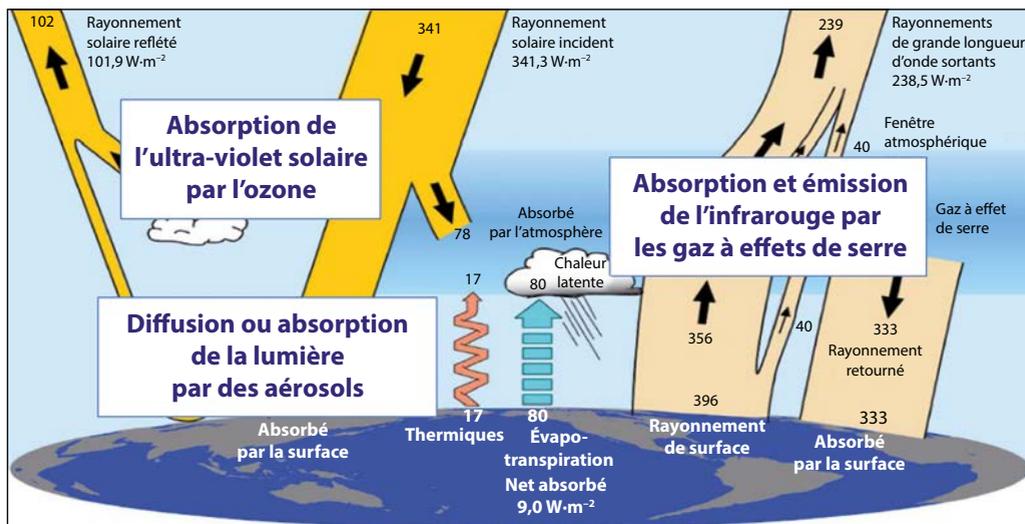


Figure 16
Flux d'énergie global (en $W \cdot m^{-2}$) et interactions avec les gaz de l'atmosphère.

duisent un forçage radiatif par effet direct. D'autres gaz produisent un forçage radiatif par effet indirect parce qu'ils vont influencer certains gaz à effet de serre comme le méthane ou des polluants qui produisent un forçage radiatif. Les particules de l'atmosphère peuvent, selon leur type d'interaction avec les radiations solaires, soit refroidir, soit réchauffer la troposphère et la surface de la Terre (Figure 17).

La suie, par exemple, va réchauffer, tandis que les sulfates vont refroidir l'atmosphère.

L'impact est important. Par exemple, dans la modélisation représentée sur la Figure 18A, tous les sulfates ont été éliminés en supposant qu'on veuille assainir l'atmosphère ; on voit que si c'était le cas, la Terre se réchaufferait de presque un degré (Figure 18B). Il en résulterait donc un accroissement de température comparable à celui dû au CO_2 depuis l'ère préindustrielle.

La Figure 19 montre le forçage radiatif produit par différentes espèces chimiques depuis la période préindustrielle (1750).

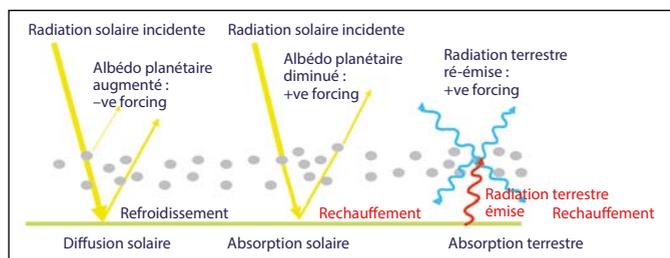


Figure 17
Effet radiatif direct des aérosols troposphériques.

Source : Crown copyright Met Office.

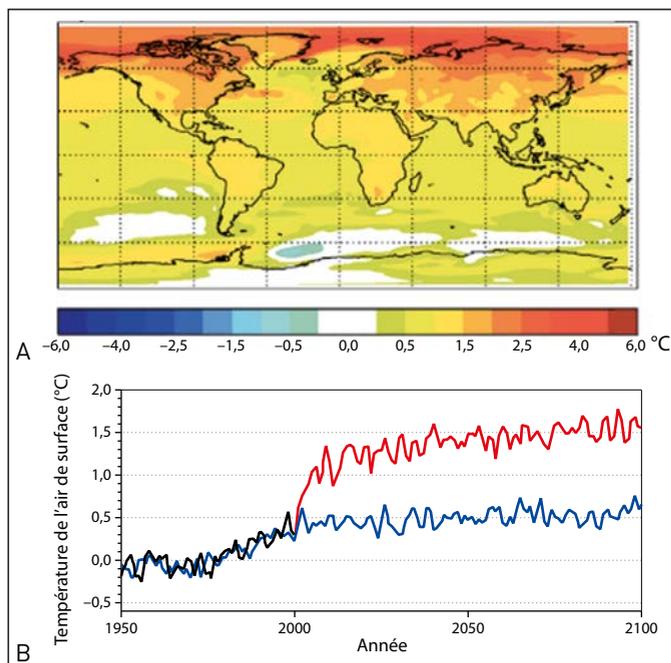


Figure 18

Impact des aérosols à base de sulfate sur la température à la surface de la planète. A) Modèle global montrant l'élévation de la température qui résulterait de l'élimination des aérosols à base de sulfate ; B) température de l'air à la surface de la Terre. Courbe rouge : sans sulfate ; courbe bleue : avec sulfates.

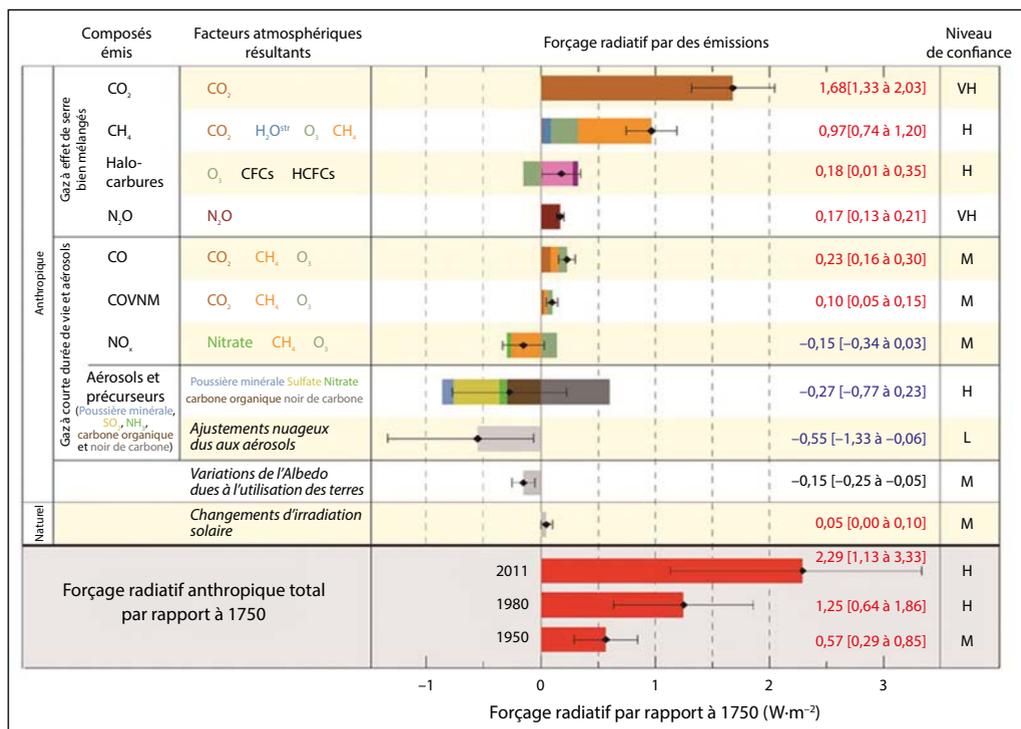


Figure 19

Effets indirects de la chimie atmosphérique sur le climat. COVNM : Composés organiques volatils non méthaniques.

Source : IPCC, AR5, WG1, 2013.

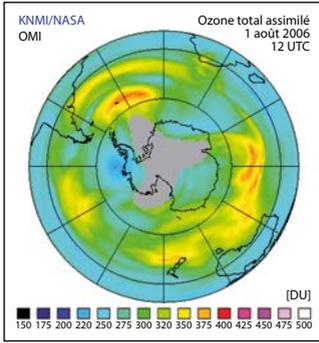


Figure 20

Observation satellite du trou d'ozone en 2006 montrant un impact sur la dynamique de l'hémisphère Sud.

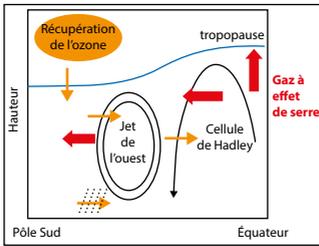


Figure 21

Futurs changements prévisibles sur l'hémisphère Sud.

Source : d'après Son et coll. (2010).

Figure 22

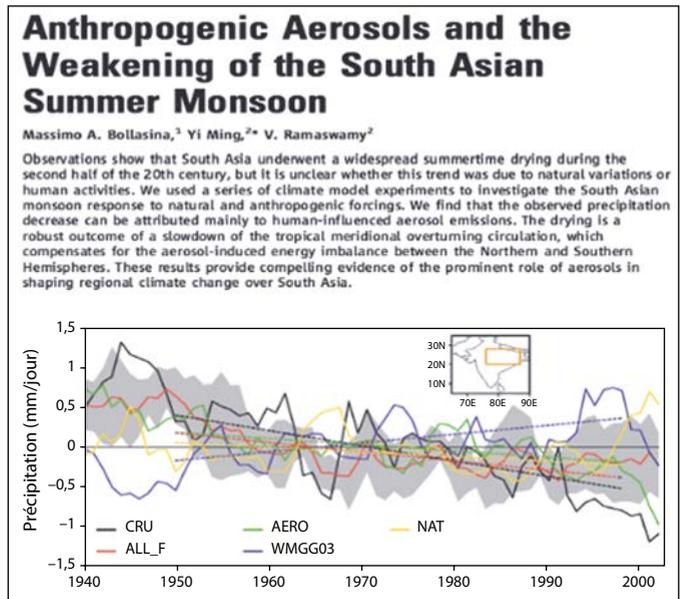
Les aérosols anthropogéniques des pays industrialisés et l'affaiblissement de la mousson d'été en Asie.

3.2. Le Trou d'ozone et le climat

Les phénomènes d'origine chimique de l'atmosphère ont une influence significative sur l'évolution du climat. Le trou d'ozone (Figure 20), par exemple, modifie quelque peu la dynamique de l'atmosphère dans l'hémisphère Sud. Les modèles montrent que la disparition du trou d'ozone, prévue vers 2050, conduira vraisemblablement au déplacement en latitude des grandes cellules de la circulation atmosphérique, dans une direction qui est opposée à celle qui devrait résulter de l'addition des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Il y aura donc une sorte de compensation entre les deux processus qui va se produire : l'augmentation des gaz à effet de serre dans les années futures mais aussi la disparition du trou d'ozone (Figure 21).

Un autre exemple d'interaction entre la chimie et la dynamique de l'atmosphère est fourni par l'effet de la pollution de l'air sur la mousson indienne (Figure 22). La formation de particules atmosphériques liée à l'activité des pays industriels, plus importante dans l'hémisphère Nord, produit vraisemblablement une modification de la circulation dans les tropiques et, en particulier, de la localisation et de l'intensité de la mousson. D'après certains modèles, cela expliquerait l'affaiblissement observé de la mousson avec ses conséquences importantes sur l'agriculture de l'Inde ou de l'Asie du Sud.

Puisque les composés réactifs et les aérosols ont un impact significatif sur le climat, il a été suggéré de contrôler en premier lieu la concentration à relativement courte durée



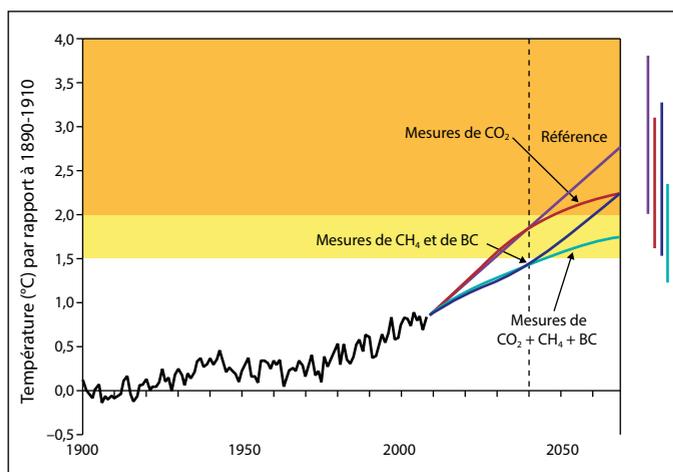


Figure 23

Prévision de l'évolution de la température avec la diminution des gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 et BC).

Source : DrewShindell et coll. (2012). *Science*, 335 : 183.

de vie comme le méthane et l'ozone (Figure 23). Les effets sur le réchauffement de la planète devraient se manifester rapidement. Cette stratégie est intéressante mais insuffisante car, à long terme, l'augmentation de la température de la Terre ne sera maîtrisée que par une limitation des émissions de CO_2 .

4 L'impact des changements climatiques sur la qualité de l'air

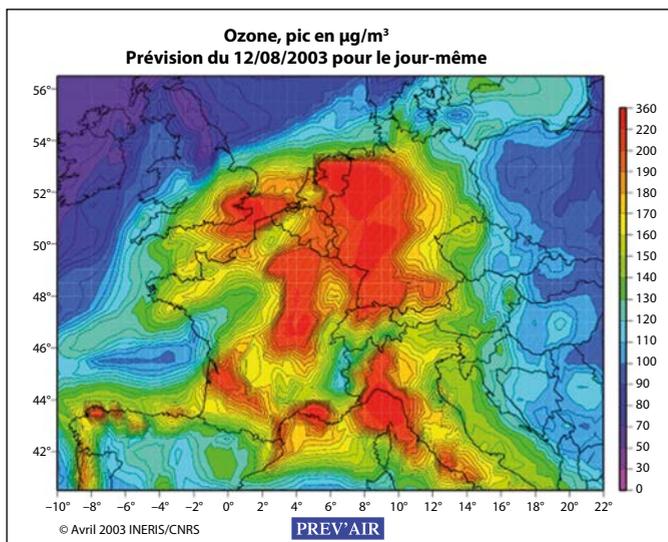
Nous devons aussi nous attendre à un impact des changements climatiques sur la composition chimique de l'atmosphère et donc sur la qualité de l'air. Il est difficile de quantifier cet impact. On peut s'attendre à un réchauffement des continents supérieur au réchauffement global, ce qui devrait augmenter l'ozone et les

aérosols atmosphériques dans ces régions. Les précipitations pourraient augmenter parce le réchauffement entraînera une augmentation de l'évaporation. Cette augmentation des précipitations entraînera une élimination des espèces solubles des aérosols atmosphériques. L'augmentation de la nébulosité tendra par ailleurs à réduire la production d'ozone. Le réchauffement des pôles devrait diminuer la circulation des vents entre l'équateur et les pôles.

Le bilan de toutes ces conséquences est donc complexe et difficile à déterminer, et il est donc intéressant de voir ce qui s'est passé pendant la vague de chaleur de 2003, qui représente peut-être une préfiguration d'une augmentation de la température. La Figure 24 montre l'apparition immédiate de pics d'ozone extrêmement importants. On estime à plu-

Figure 24

Pic d'ozone lors de la vague de chaleur de l'été 2003 en Europe, un exemple d'impact des changements climatiques sur la qualité de l'air. On estime qu'en Europe il y a eu 44 000 décès prématurés pendant cette période.



sièurs dizaines de milliers le nombre de décès prématurés pendant cette vague de chaleur et on pense qu'un tiers,

peut-être même la moitié de ces décès, a été causé par la dégradation de la qualité de l'air qui en a résulté.

Le système terrestre est complexe

Les différents exemples présentés dans ce chapitre montrent qu'il existe des rétroactions importantes entre la composition chimique de l'atmosphère et le climat. Ces interactions font intervenir des processus qui lient la chimie avec la température, la dynamique de l'atmosphère, et aussi les émissions par la biosphère terrestre. Ces processus ne sont pas tous très bien connus, en particulier l'effet de la biosphère sur la composition chimique de l'atmosphère. Une meilleure étude expérimentale de ces processus est donc nécessaire. La modélisation du système terrestre permet de quantifier, d'étudier ces interactions, mais dans cette démarche scientifique, il est évident qu'il demeure des incertitudes et des questions qui requièrent un effort de recherche.

Des progrès restent à faire. Il existe des solutions qui permettront à la fois d'améliorer la qualité de l'air et de préserver le climat. La réduction de l'ozone dans la troposphère est un exemple, la réduction de la suie dans l'atmosphère en est un autre. Ce sont des mesures qui auront un effet sur le climat et sur la qualité de l'air à très court terme, mais qui ne doivent pas nous faire oublier qu'en définitive, à long terme, c'est la réduction du CO₂ qui est importante si on veut limiter les effets de l'activité humaine sur le climat du futur.

Partie 3

La transformation
du système énergétique
pour assainir
notre atmosphère et gérer
le risque climatique

Que faire du CO₂ ? De la chimie !

Marc Fontecave est professeur au Collège de France, où il travaille actuellement sur le développement de systèmes de photosynthèse artificielle.

La révolution énergétique annoncée aura bien lieu. Mais quand ? Les politiques et ceux qui craignent un réchauffement climatique rapide souhaitent aller vite. Malheureusement, il n'y a pas dans l'histoire de l'humanité d'exemples de révolutions technologiques effectives qui aient été décrétées par un pouvoir politique ou par quelques associations actives ; cette révolution énergétique ne se fera donc qu'à la vitesse des progrès scientifiques et technologiques. Il s'agit donc d'abord d'identifier les questions scientifiques et technologiques qui bloquent l'avènement de cette révolution espérée et de les résoudre. Cela peut prendre du temps. Il vaut mieux le dire aux citoyens.

Par ailleurs, il faut inviter, inciter, l'ensemble des chercheurs, professeurs et

étudiants des domaines de recherche concernés d'y travailler activement, et on peut espérer que la pertinence et l'urgence de cet enjeu pousseront d'autres jeunes à s'investir dans les disciplines qui vont résoudre ces questions, et tout particulièrement la chimie, qui jouera un rôle majeur dans les progrès scientifique et technique associés au développement des nouvelles technologies de l'énergie.

1 Le dioxyde de carbone et le réchauffement climatique : que faire du CO₂ d'origine industrielle ?

Quand on parle du CO₂ atmosphérique, on le pense d'abord comme une molécule essentiellement néfaste dont il faudrait se débarrasser, en oubliant tout ce à quoi elle

pourrait servir comme source de carbone, grâce à la chimie. Cela sera discuté plus loin... L'idée qui en découle est celle de la capture et de la séquestration du CO_2 produit par les activités humaines, qui conduiraient à en limiter les émissions, et par voie de conséquence l'effet de serre associé !

1.1. La capture et la séquestration du CO_2 atmosphérique

Un cycle du CO_2 , dans un monde nouveau qui inclut la capture/séquestration des émissions notamment dues à l'activité industrielle et leur utilisation rationnelle, est schématisé sur la **Figure 1**.

Le **Tableau 1** donne la production annuelle de CO_2 issue des différents secteurs industriels tels que la métallurgie, les raffineries, les cimenteries, les centrales thermiques, etc. Ces sites de grosse produc-

tion de CO_2 ne contribuent qu'à environ 10 % du total, mais représentent tout de même une quantité considérable de gaz à capturer et à séquestrer. On ne peut évidemment pas récupérer le CO_2 issu des pots d'échappement des voitures ! Il existe effectivement des technologies de capture utilisables à l'échelle industrielle, mais elles demeurent encore coûteuses, et c'est donc un sujet de recherche et de développement. Par ailleurs, compte tenu du faible nombre de réalisations à des échelles réalistes et de leur échec relatif, la faisabilité de ce scénario reste encore discutable.

La **Figure 2** donne la liste des technologies existantes permettant de séparer et de capturer le CO_2 atmosphérique. Les technologies les plus évoluées et les plus utilisées sont basées sur l'*absorption chimique*, qui est une réaction simple entre le CO_2

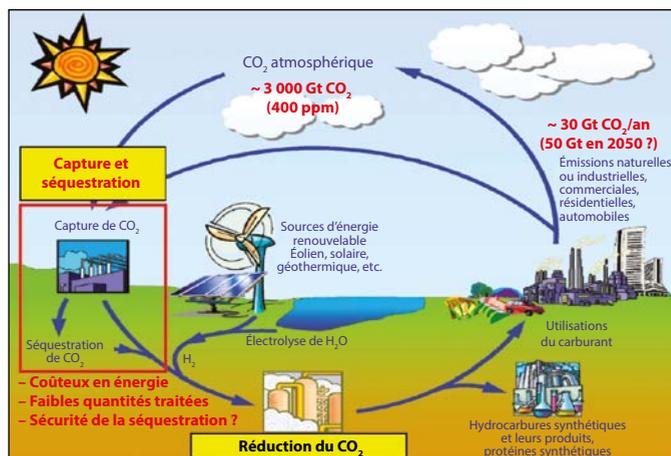


Figure 1

Comment inclure la capture et la séquestration du dioxyde de carbone dans son cycle de vie ?

et une base – la monoéthylamine (MEA) ou la diéthylamine (DEA) – qui conduit à des produits stables. Cette stabilité a comme conséquence des coûts énergétiques considérables dans l'étape suivante de récupération du CO₂. La *cryogénie* est aussi une technique bien développée à l'échelle industrielle. De nombreuses recherches sont menées sur l'utilisation d'autres techniques telles que l'*adsorption physique*, l'utilisation de *membranes* polymères ou inorganiques, ainsi que l'utilisation des *micro-organismes* pour capturer le CO₂ [voir le **Chapitre de J. Legrand** dans cet ouvrage *Chimie et changement climatique*, EDP Sciences, 2016].

1.2. Le stockage du CO₂

Différents sites sont possibles pour stocker le CO₂ récupéré ; il peut s'agir de champs d'hydrocarbures avec récupération assistée, d'aquifères salins profonds, de champs d'hydrocarbures épuisés, ou encore des veines de charbon (**Figure 3**). Il faut donc évaluer toutes les capacités de stockage qui sont en réalité nombreuses, mais pour lesquelles se posent des problèmes d'acceptabilité sociale et de sécurité.

De plus, l'autre problème est qu'il est très rare que les sites industriels de production massive de CO₂ soient localisés au même endroit que les réserves potentielles de stockage. Le problème du stockage demeure encore un problème pratique complexe sur lequel on est loin des applications à grande échelle.

Tableau 1

Comparaison de la production de CO₂ par les différents secteurs industriels.

Secteur industriel	Production annuelle de CO ₂ en millions de tonnes
Oxyde d'éthylène	10-15
Édulcorants LNG	25-30
Ammoniac	160
Éthène (et autres procédés pétrochimiques)	155-300
Fermentation	> 200
Fer et acier	~ 900
Raffineries de pétrole	850-900
Ciment	> 1000

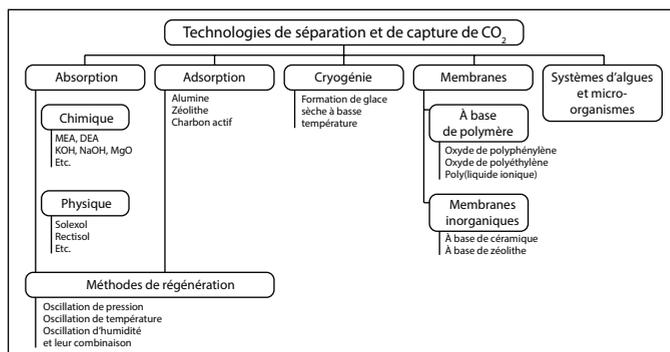


Figure 2

Les techniques de capture et de séparation du CO₂ (en bas : modélisation d'une usine de séparation du CO₂).

Au niveau mondial, il existe actuellement treize sites expériences effectives de stockage du CO₂, la très grande majorité aux États Unis et au Canada. Les quantités de CO₂ stockées sur ces sites sont néanmoins très faibles. En France, le groupe Total avait

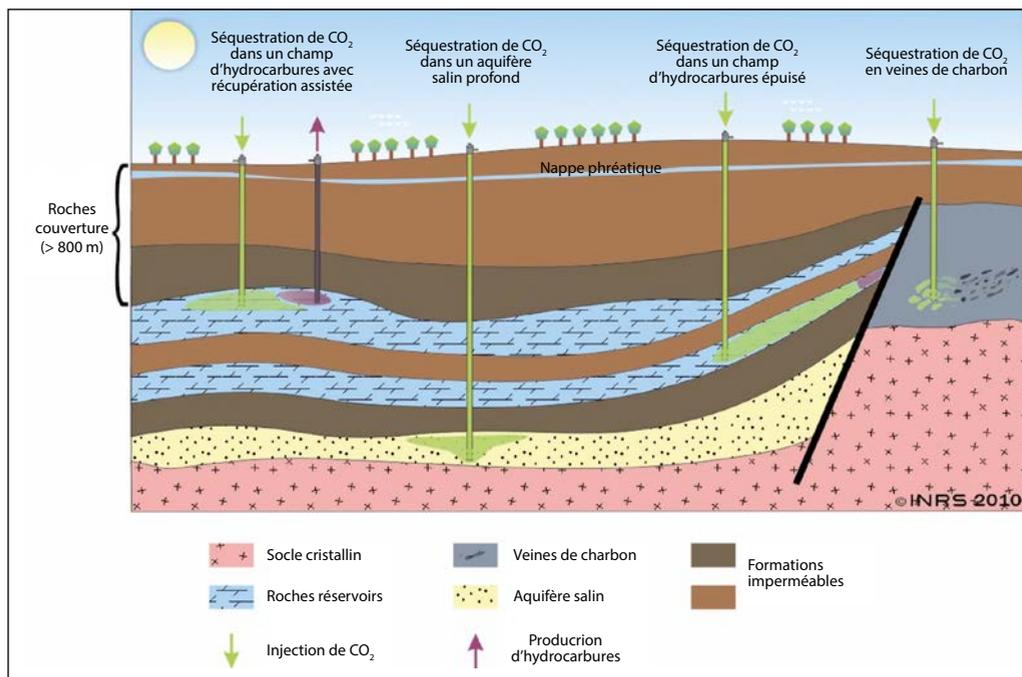


Figure 3

Les différents types de séquestration géologique envisageables du CO₂.

lancé un projet avec une unité à Lacq (Pyrénées-Atlantiques) qui a été abandonné en 2013 (Figure 4).

Actuellement, ce n'est donc pas par la capture et la séquestration du CO₂ que l'on résoudra le problème du réchauffement climatique si le CO₂ en est le seul responsable. Ces technologies ne sont pas encore assez matures pour être développées à grande échelle : elles sont notamment énergétiquement et donc financièrement coûteuses.

Figure 4

Unité pilote de stockage de CO₂ du groupe Total à Lacq (Pyrénées-Atlantiques).



2 Le stockage chimique des énergies renouvelables via la transformation du CO₂

Certains rapports, notamment celui produit par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) en 2015, envisagent la possibilité d'un mix énergétique utilisant 100 % d'énergies renouvelables. On pourrait finir par le croire, alors qu'en réalité ce n'est ni pour demain ni actuellement considéré comme techniquement possible, notamment parce que **le problème du stockage de l'énergie n'est pas résolu**. Les énergies renouvelables d'origine solaire ou éolienne sont intermittentes, comme le montrent les variations

de productions électriques solaire (orange) et éolienne (bleu) sur la **Figure 5** pour l'année 2013 en France. L'énergie solaire est intermittente du fait des nuits, et des nuages ; pour l'énergie éolienne, c'est le manque de vent une partie significative de l'année. De plus, ces énergies renouvelables ont besoin d'une puissance installée beaucoup plus grande que la puissance produite, ce qui est coûteux.

Prenons une première hypothèse en lien avec la loi française sur la transition énergétique, et pour référence l'année 2013 avec un besoin d'énergie électrique nationale de 547 TWh/an. Si nous faisons l'hypothèse d'un mix avec 50 % pour la part du nucléaire (ce qui n'est pas le cas encore aujourd'hui), avec le maintien des niveaux actuels de l'hydroélectricité et de l'énergie issue de la biomasse et du traitement des déchets, cela nécessite une production d'énergie électrique de 193 TWh, sur les douze mois de l'année, d'origine éolienne et photovoltaïque (**Figure 6**).

À cause de l'intermittence, en France, pendant environ la moitié de l'année, les sources d'énergie renouvelable produisent davantage d'électricité que nécessaire, cette électricité étant perdue (partie bleue de la **Figure 6**) si elle n'est pas stockée pour servir dans la deuxième partie de l'année, où les énergies renouvelables produisent insuffisamment.

Si on n'a pas de stockage – ce qui se passe dans beaucoup d'endroits dans le monde –, on remplace alors les énergies renouvelables par des

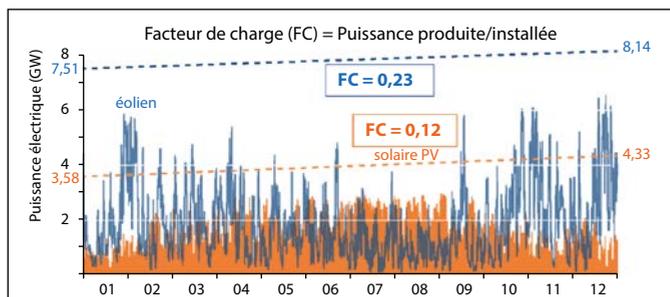


Figure 5

Puissance électrique éolienne (en bleu) et solaire (PV : photovoltaïque, en orange) produites en France en 2013.

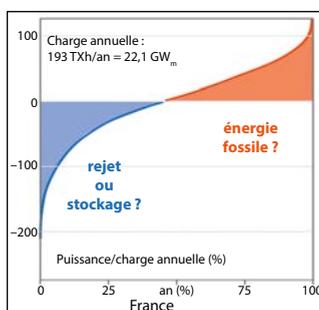


Figure 6

Écart entre les besoins électriques annuels (charge annuelle) et la production issue des énergies renouvelables intermittentes : rapport en % de la puissance produite sur la charge annuelle pendant l'année.

énergies fossiles (partie orange de la **Figure 6**), pour alimenter ce manque. Dans le cas de la France et avec les chiffres mentionnés plus haut, le besoin de stockage est de l'ordre de 14 TWh/an. Ces chiffres sont inspirés d'une étude de l'équipe de D. Grand¹.

Hypothèse 1 :

Production électrique 547 TWh/an (2013) :

- nucléaire 273 TWh/an (50 %) ;
- hydroélectricité 74,5 TWh/an ;
- biomasse/déchets 6,2 TWh/an.

Reste : 193 TWh/an

Hypothèse 2 :

100 % énergies renouvelables (solaire/éolien).

Stockage nécessaire : 14 TWh/an

1. <http://realisticenergy.info>

2.1. Les capacités de stockage d'énergie électrique

Les *barrages* ont une grande capacité de stockage : le plus grand barrage de France est celui de Grand'Maison (*Figure 7*), avec une capacité de stockage de 35 GW/an. Donc, si on se basait uniquement sur l'hydroélectricité et les barrages, il faudrait construire 400 barrages de Grand'Maison pour stocker les 14 TWh dont on a besoin quand la production d'énergie renouvelable est insuffisante, alors qu'il n'y a en fait pas un seul autre site comparable à Grand'Maison disponible en France. Cela montre clairement l'ampleur du défi relatif



Figure 7

Barrage de Grand'Maison (Rhône-Alpes).

au stockage d'énergie dans le cas d'un mix électrique avec environ seulement 1/3 d'énergies renouvelables.

Les autres possibilités de stockage de l'énergie sont résumées sur la *Figure 8* : le stockage électrochimique (basé sur les batteries), le stockage chimique et le stockage naturel (basé sur la biomasse).

Peut-on répondre à l'intermittence en récupérant l'excès de ces énergies renouvelables, en le stockant de façon électrochimique avec des batteries, ou en décomposant l'eau en hydrogène, ou enfin en transformant le CO_2 en molécules riches en énergie et utiles pour l'industrie ?

2.2. Stocker l'énergie en transformant le CO_2 en molécules utiles

La photosynthèse naturelle en est un bon exemple. La molécule de CO_2 est une molécule très stable, c'est pourquoi sa transformation est difficile. Quand l'énergie solaire est utilisée pour transformer na-

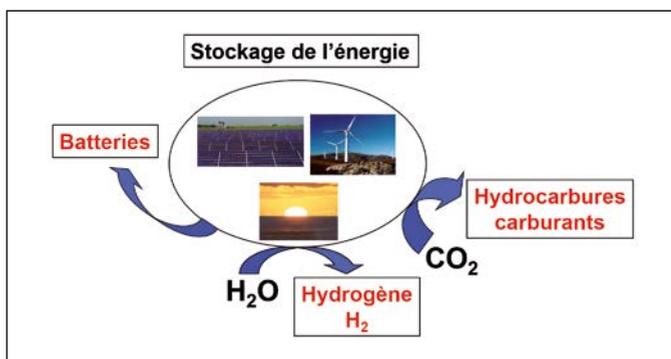


Figure 8

Les différentes possibilités de stockage de l'énergie électrique

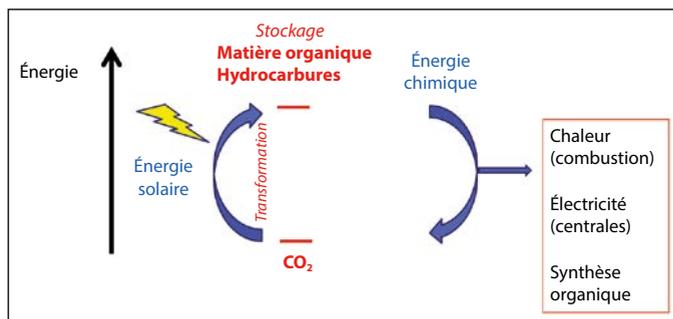


Figure 9

On peut stocker de l'énergie solaire via le CO₂ en l'utilisant comme source de carbone pour synthétiser de la matière organique, source de chaleur, d'électricité, ou encore ressource pour faire de la synthèse organique.

turellement cette molécule en matière organique via la photosynthèse, l'énergie solaire est stockée dans les énergies des liaisons carbone-carbone, carbone-hydrogène et oxygène-hydrogène formées à partir du CO₂ (Figure 9).

Le stockage n'a évidemment de sens que si l'on dispose des mécanismes pour récupérer l'énergie stockée chimiquement : ce peut être sous forme de chaleur ou d'électricité dans des centrales, ou encore pour la synthèse organique.

Sur ce modèle mis au point par la nature, les chercheurs « rêvent » donc de mettre au point des procédés utilisant comme réactifs du CO₂ et de l'eau, du Soleil et évidemment des catalyseurs ou des photocatalyseurs, parce que les réactions de photosynthèse sont à la fois thermodynamiquement et cinétiquement contraintes, pour produire divers composés : composés organiques, polymères et peut-être des carburants (Figure 10). On voit, avec les

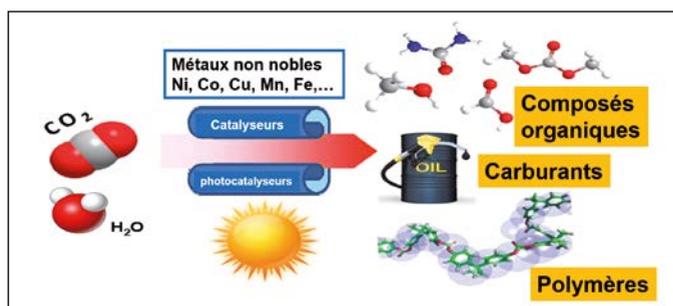


Figure 10

L'idéal serait de pouvoir transformer le CO₂ en composés organiques, carburants, polymères..., grâce à l'utilisation de catalyseurs ou de photocatalyseurs

carburants, que le cycle est bouclé car, certes, on va continuer à produire du CO_2 , mais celui-ci vient lui-même du CO_2 par transformation de cette molécule.

3 La photosynthèse naturelle

3.1. Le stockage naturel du CO_2 dans la biomasse

Le stockage massif du CO_2 à la surface de la Terre est mis en œuvre par des organismes vivants (**Figure 11**) : des plantes, des microalgues, des cyanobactéries (voir le **Chapitre de J. Legrand** dans *Chimie et changement climatique*, EDP Sciences, 2016). Ces organismes photosynthétiques disposent d'un système photosynthétique qui fascine les chercheurs, biologistes, chimistes, physiciens, une

machinerie qui permet de récupérer l'énergie solaire et de la combiner avec du CO_2 et de l'eau pour produire toutes les molécules organiques de la biomasse.

Le Soleil envoie 100 000 TW de puissance sur la planète dont 100 TW sont transformés en biomasse, ce qui est bien au-dessus de nos besoins car nous ne consommons actuellement que 16 TW de puissance.

Dans la photosynthèse naturelle, le CO_2 atmosphérique est transformé en matière organique (la biomasse), représentée sur la **Figure 12** par une molécule de glucose. Dans la nature, les organismes vivants réalisent cette réaction parce qu'ils ont besoin de cette énergie stockée sous forme chimique pour alimenter en énergie leur métabolisme, leurs biosynthèses. Le CO_2 est

Figure 11

Plantes, microalgues, cyanobactéries... la biomasse est capable, via la photosynthèse, de stocker du CO_2 et 100 TW/an d'énergie

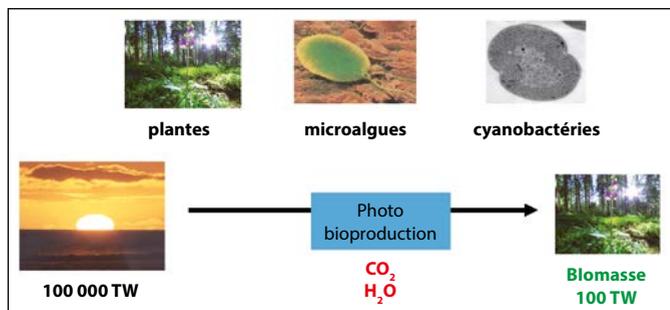
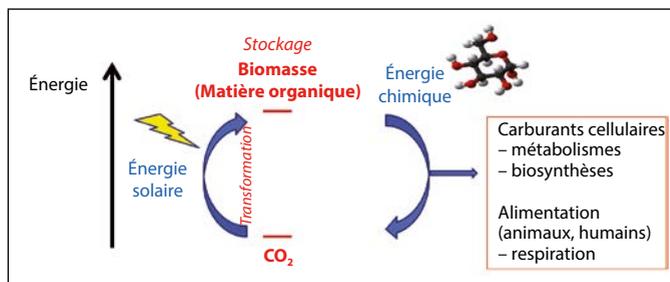


Figure 12

La photosynthèse est un fascinant processus de stockage naturel de l'énergie en utilisant le CO_2 comme source de carbone pour synthétiser le glucose, source d'énergie des organismes vivants.



ensuite rejeté dans l'atmosphère par la respiration de tous les organismes vivants. C'est donc un cycle vertueux où le CO₂ et le Soleil nourrissent l'homme, et l'homme en respirant redonne le CO₂ à la nature.

3.2. De la biomasse aux biocarburants

La biomasse représente une énorme réserve de molécules riches en énergie, et le défi posé depuis longtemps est de l'utiliser pour produire des biocarburants (Figure 13).

3.2.1. Les biocarburants de 2^e génération

Actuellement, pour la production des carburants dits de 2^e génération, l'objectif est de ne pas utiliser les parties comestibles des plantes mais uniquement les matériaux ligno-cellulosiques des parois cellulaires des plantes qui contiennent de la lignine, de l'hémicellulose et des celluloses (Figure 14). Ce sont des polymères extrêmement riches en sucre, donc remplis d'énergie.

Le défi est donc de récupérer ces parties non comestibles.



Figure 13

Peut-on synthétiser des biocarburants à partir de la biomasse et de l'énergie solaire ?

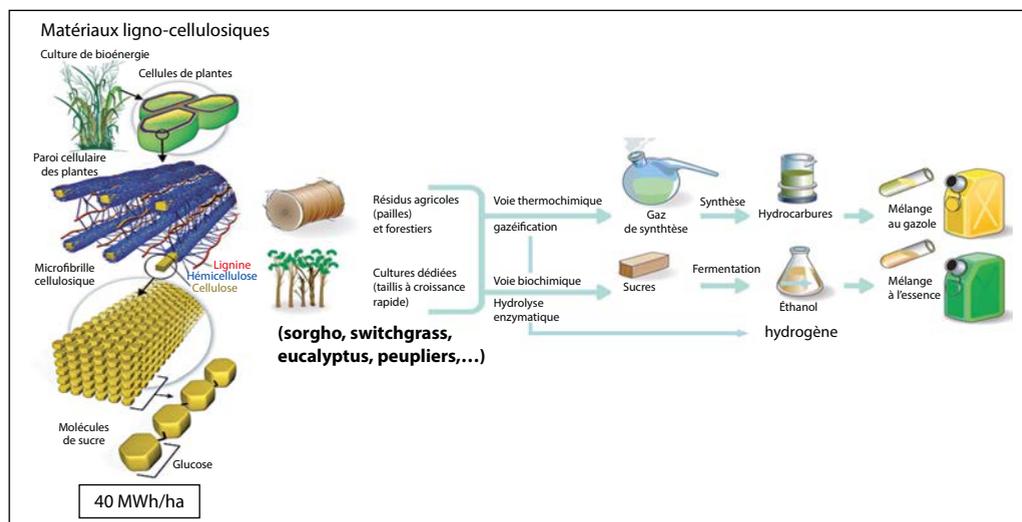


Figure 14

Un espoir d'utilisation de la biomasse comme source d'énergie repose sur les matériaux ligno-cellulosiques, riches en sucre et donc en énergie, pour produire des biocarburants de 2^e génération.

tibles issues de plantes des cultures dédiées, des résidus agricoles ou forestiers, et de les transformer par différents procédés chimiques ou biochimiques pour produire des hydrocarbures ou de l'éthanol, que l'on peut ensuite utiliser comme carburants, dans le transport par exemple.

3.2.2. Les biocarburants de 3^e génération

Beaucoup d'espoir repose sur les biocarburants dits de 3^e génération (voir le **Chapitre de J. Legrand** dans *Chimie et changement climatique*) qui sont synthétisés par des micro-organismes photosynthétiques du type algues et cyanobactéries. L'objectif est de pouvoir développer des fermes dans lesquelles ces micro-algues puissent transformer le mélange eau, CO₂ et Soleil en biodiesels par exemple. Les microalgues, dont un champ est représenté en rouge sur la **Figure 15**, ont la capacité de produire des quantités massives de lipides, qu'elles excrètent, et qui sont relativement faciles à récupé-

rer ensuite. Les rendements de photosynthèse sont bien supérieurs à ceux des plantes. De plus, l'avantage est qu'il n'y a pas de compétition avec la production alimentaire. Ce sont donc des organismes très précieux puisqu'ils fixent 50 milliards de tonnes par an de CO₂, en le transformant en lipides, qui peuvent être utilisés comme source de biodiesels.

3.2.3. Les limites économiques à la production de biocarburants

Il y a beaucoup de débats autour de la production de ces biocarburants à partir des algues.

Dès 2009, par exemple, la compagnie pétrolière américaine Exxon annonçait des investissements de 600 millions de dollars pour le développement de la production de biocarburants à partir des microalgues (**Figure 16**). En 2013, la même compagnie n'a en fait investi que 100 millions de dollars et annonce qu'elle abandonne les recherches dans ce domaine car ses

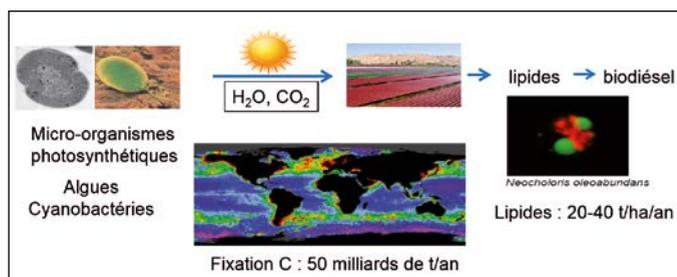


Figure 15

Cyanobactéries, microalgues..., ces micro-organismes photosynthétiques répartis en divers lieux de la planète sont capables de réaliser la photosynthèse de lipides utilisés comme source de biodiesel. On peut envisager de développer des fermes à microalgues (ici neochloris oleoabundans) comme sources de biocarburant.

efforts n'ont pas conduit à une production de biocarburants économiquement satisfaisante.

Certains scientifiques renommés, tel Hartmut Michel, prix Nobel de chimie en 1988 (Figure 17), ont même des points de vue extrêmes sur ce sujet. Il a récemment écrit un article dans lequel il évoque « The nonsense of biofuels ». Sur la base notamment des très faibles rendements et des surfaces massives qu'il faudrait consacrer à la production de biocarburants, il exclue ce scénario.

Si on prend en effet l'exemple des États-Unis, qui sont les plus gros consommateurs d'énergie, la Figure 18 compare les surfaces qui seraient nécessaires pour satisfaire les besoins américains selon que les carburants sont issus de l'éthanol dérivé du maïs



Figure 16

Extrait d'un article du journal Chemistry Engineering News.



Figure 17

Hartmut Michel, prix Nobel de chimie, dénonce « The nonsense of biofuels ».

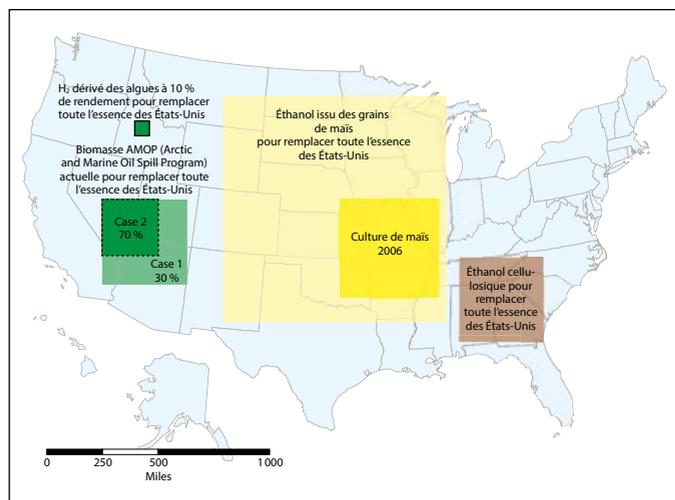


Figure 18

Comparaison des surfaces nécessaires pour la culture de maïs, cellulose et micro-organismes aquatiques pour la production du biocarburant américain.

(biocarburant de première génération, en jaune), de la cellulose (biocarburants de 2^e génération, en marron) ou des algues (biocarburant de 3^e génération, en vert). On voit qu'il s'agit de surfaces totalement irréalistes.

4 Utilisation du CO₂ dans l'industrie² actuelle et potentielle

Il est bon de rappeler que l'utilisation du CO₂ comme matière première industrielle existe déjà. L'industrie chimique est en effet essentiellement une industrie du carbone (*Figure 19*).

Les produits chimiques de plus en plus élaborés, issus des laboratoires de chimie académiques et industriels, utilisent quatre sources prin-

cipales de matière première : le pétrole, le gaz et le charbon, et un peu la biomasse. Peut-on penser au CO₂ comme une source de carbone alternative ?

Peut-être qu'un jour il n'y aura plus de gaz, de pétrole ni de charbon, et qu'il ne restera plus que le CO₂ et la biomasse comme sources de carbone, et il faudra bien alors trouver des technologies qui utilisent ces sources, parce qu'il est impossible d'imaginer un monde qui ne soit pas carboné... Le nôtre est totalement carboné !

4.1. L'utilisation actuelle du CO₂ dans l'industrie

Il y a actuellement 3 000 Gt de CO₂ dans l'atmosphère mais qui ne représentent que

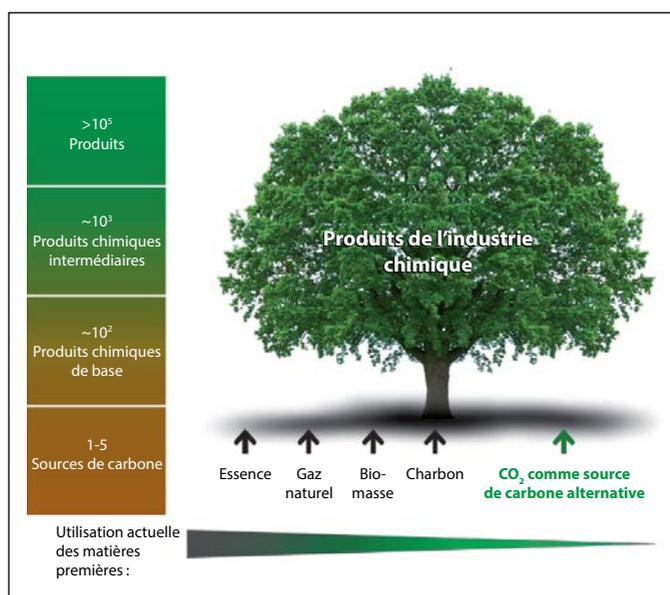


Figure 19

Les sources de carbone utilisées comme matière première pour la production de l'industrie chimique.

400 ppm (partie par million) des gaz atmosphériques. La production anthropogénique du CO₂ est de 30 Gt/an. L'industrie consomme actuellement 150 Mt/an de CO₂, c'est-à-dire moins de 0,5 % de la production anthropogénique : la **Figure 20** indique la quantité annuelle de CO₂ consommée selon le type de production. Ces chiffres indiquent bien que cette stratégie n'est pas destinée à résoudre les problèmes de changement climatique associés au CO₂.

L'industrie chimique sait en effet déjà produire des molécules utiles à partir de CO₂ (**Figure 21**). Celles-ci sont assez simples, et le **Tableau 2** donne le tonnage de CO₂ utilisé dans la production industrielle de ces molécules, actuel et potentiel. Ces tonnages sont faibles, mais on peut certainement mieux faire.

4.2. Les technologies émergentes de valorisation du CO₂

4.2.1. Fixation dans la matière organique

La *conversion du CO₂ en polymères* se développe beaucoup car, comme on le voit sur la **Figure 22A**, qui représente la stabilité du stockage de CO₂ en fonction de la quantité de CO₂ fixée selon les différentes familles de produits, les résines et les polycarbonates permettent de fixer longtemps de grosses quantités de CO₂. À l'inverse, dans les composés organiques de la chimie fine, qui sont des molécules plus fragiles, on fixe moins de CO₂, et pendant un temps plus court.

Le second point important est la faisabilité technique du procédé de fixation en fonction du potentiel de stoc-

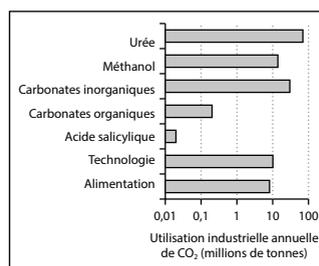


Figure 20

Répartition de la consommation annuelle de CO₂ par l'industrie.

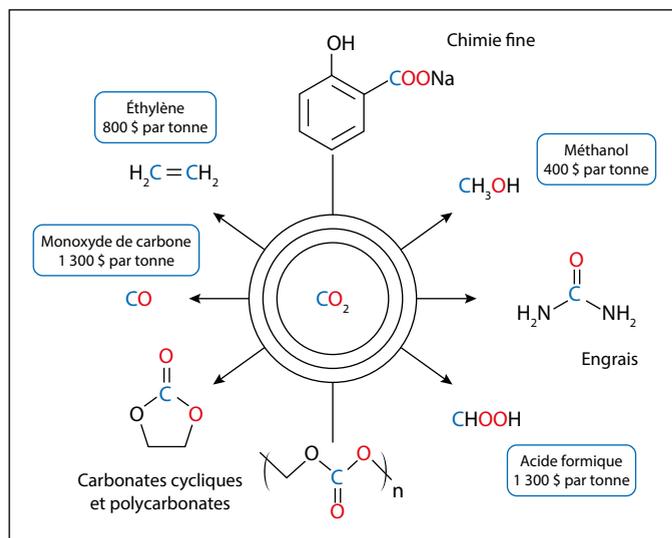


Figure 21

De nombreuses molécules organiques d'intérêt industriel peuvent être synthétisées à partir de CO₂.

Tableau 2

Part annuelle des différentes utilisations industrielles du CO₂

Produit chimique ou application	Volume industriel (millions de tonnes par an)	Utilisation industrielle de CO ₂ (millions de tonnes par an)	Utilisations futures attendues de CO ₂
Urée	100	70	10 ² millions de tonnes
Méthanol (additif à CO)	40	14	Gigatonnes
Carbonates inorganiques	80	30	-
Carbonates organiques	2,6	0,2	10 ² millions de tonnes
Acide salicylique	0,06	0,02	10 ² kilotonnes
Technologies	10	10	
Alimentaire	8	8	

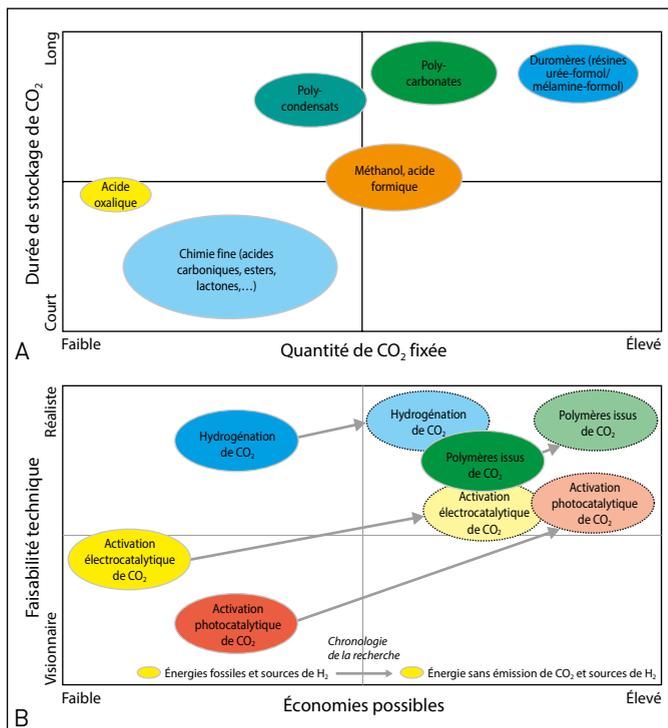


Figure 22

A) Diagramme représentant la durée de stockage du CO₂ en fonction de la quantité de CO₂ fixée ; B) diagramme représentant la faisabilité technique en fonction du potentiel de stockage du CO₂

kage (**Figure 22B**). Plus les flèches sont courtes, plus les recherches sont avancées. On voit que l'on n'est pas très loin de pouvoir effectivement développer des procédés de stockage de CO₂ dans les polymères.

Les technologies de réduction par hydrogénation en acide formique et en méthanol sont à peine plus avancées que les technologies d'électroréduction ou de photoélectroréduction. Il s'agit là de domaines qui nécessitent encore beaucoup de recherche et de développement.

4.2.2. La synthèse de la butenafine : CO₂ et la chimie verte

La butenafine est un fongicide antimycosique. Récemment, le chimiste allemand W. Leitner a mis au point un procédé de synthèse dans lequel il remplace le procédé classique (en quatre étapes avec

une production de déchets et de sous-produits inorganiques toxiques importante, et avec des changements complexes de solvants) par une nouvelle synthèse dans laquelle il utilise des produits de départ comparables, qu'il traite en une seule étape par de l'hydrogène et du CO₂ en présence de catalyseur, où le seul sous-produit est l'eau, et avec une excellente économie d'atomes (**Figure 23**).

Il existe de nombreux développements dans le sens de cette chimie inventive, particulièrement intéressante.

4.2.3. Hydrogénation du CO₂

L'hydrogénation du CO₂ en méthane est connue depuis longtemps. C'est la réaction de Sabatier qui est réalisée en présence de catalyseurs : $\text{CO}_2 + 4\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$. Cette réaction de *méthanation* peut être intégrée dans un cycle de stockage d'énergie inter-

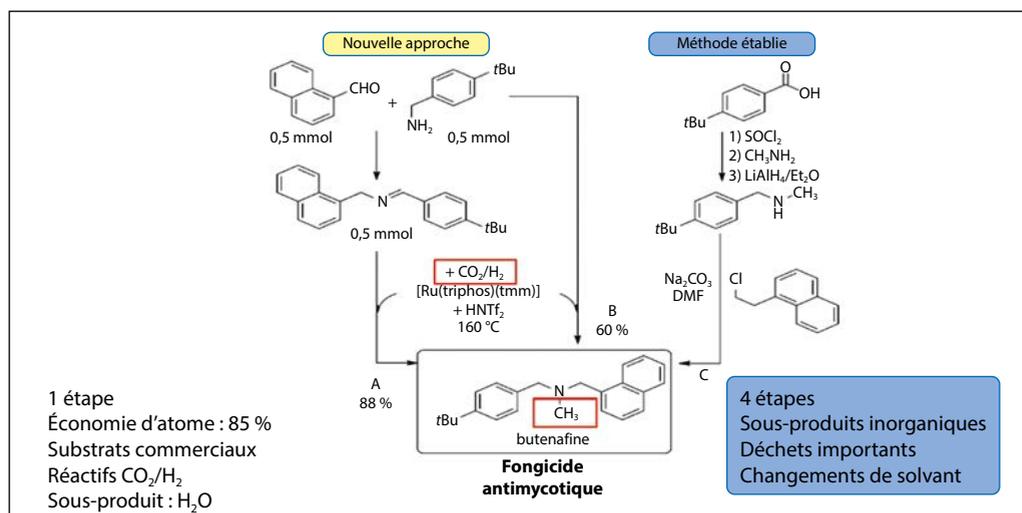


Figure 23

La synthèse de la butenafine : un exemple de l'intérêt de CO₂ en chimie fine

mittente, comme représenté sur la **Figure 24**. Cette réaction est développée à l'échelle industrielle en Chine pour la méthanation du CO_2 issu des cimenteries.

La **méthanisation** est la digestion anaérobie de la matière organique pour donner du biogaz, composé pour 50 à 70 % de méthane et de CO_2 .

La méthanisation permet de valoriser des déchets municipaux, des déchets agricoles et des déchets des agro-industries. C'est un processus naturel de dégradation de la biomasse (**Figure 25**). Le biogaz peut servir à produire de l'électricité, de la chaleur ; il peut être introduit dans les réseaux de gaz naturel, etc.

Figure 24

Cycle de la méthanation.

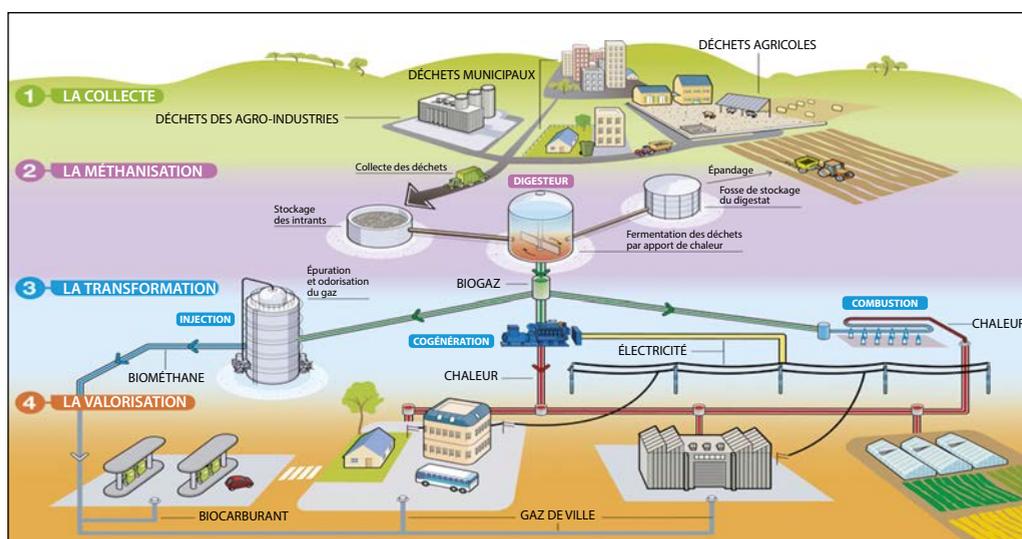
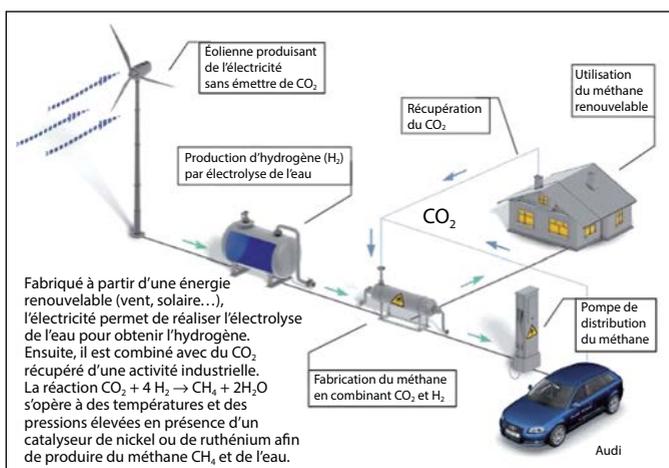


Figure 25

Mise en application de la méthanisation.

4.2.5. La photosynthèse artificielle

La photosynthèse naturelle, ce processus fabuleux d'utilisation du mélange lumière/CO₂/H₂O, est étudiée depuis au moins une cinquantaine d'années par de nombreux physiciens, chimistes, biologistes, et on commence à en comprendre les règles de fonctionnement. Cela permet d'envisager la mise au point de systèmes de photosynthèse artificielle par une approche de chimie bio-inspirée.

Il faut pour cela des matériaux qui collectent les photons de la lumière, et qui soient capables de réaliser une séparation de charges (Figure 26). L'énergie solaire est stockée dans cette séparation des charges, qui ont évidemment tendance à se recombiner, pour produire de la chaleur. Mais si on réussit à maintenir cet état de séparation des charges et à *utiliser les électrons pour réduire le CO₂ en une molécule carbonée, et à utiliser le trou d'électrons pour oxyder l'eau*, on a alors réalisé exactement ce que fait la photosynthèse naturelle.

On a donc besoin de matériaux collecteurs – qui peuvent être

des photo-sensibilisateurs moléculaires ou des semi-conducteurs² –, des catalyseurs, car il faut pouvoir capter plusieurs électrons, plusieurs trous, et ensuite les délivrer d'un bloc pour réaliser l'oxydation de l'eau à 4 électrons et la réduction du CO₂ à 2, à 4, à 8 électrons, ce qui est très difficile. Ces catalyseurs permettent donc de contrecarrer la recombinaison des charges et d'accélérer les réactions.

4.2.6. Réduction électrochimique du CO₂

On peut aussi utiliser des systèmes dans lesquels l'énergie solaire est transformée en électricité grâce à la technologie photovoltaïque (Figure 27). L'électricité est envoyée dans un électrolyseur qui réalise cette réaction de réduction de CO₂ en produits organiques en présence de catalyseurs.

Ces dispositifs existent, néanmoins, il faut les améliorer du

2. Les semi-conducteurs sont des matériaux dont les propriétés de conductivité électrique sont intermédiaires entre celle des métaux et celle des isolants.

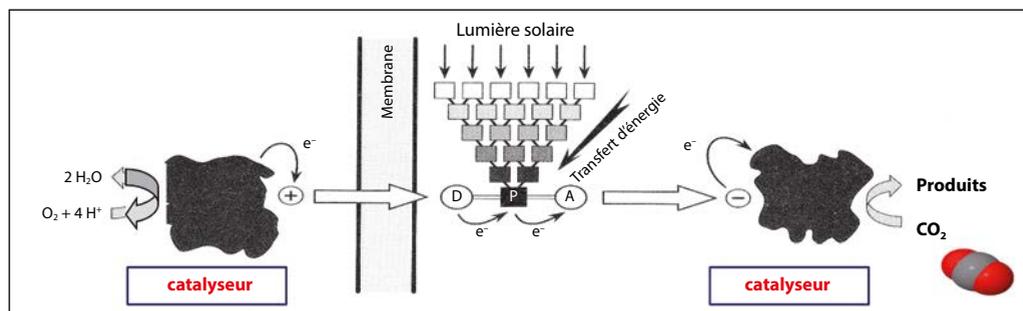


Figure 26

Mécanisme de la photosynthèse artificielle.

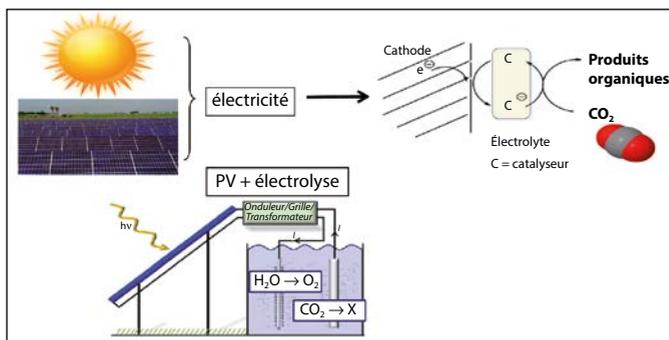


Figure 27

L'énergie solaire peut être convertie, grâce à la technologie photovoltaïque, en électricité, laquelle peut ensuite servir à réduire du CO₂ en produits organiques par électrolyse.

point de vue de leur rendement et de leur coût. En particulier, il faut développer des dispositifs à base de métaux non-nobles, car aujourd'hui, ce sont surtout du platine, du ruthénium et de l'iridium qui sont utilisés.

4.2.7. Du dioxyde au monoxyde de carbone

Dans un exemple publié en 2015 dans la revue *Nature Communication*, Michael Grätzel a utilisé un panneau photovoltaïque à base de perovskite, un matériau semi-conducteur, pour produire de l'électricité solaire envoyée ensuite dans une cellule électrolytique dans laquelle le CO₂ est transformé en CO (Figure 28). Les rendements sont relativement bons et même meilleurs que ceux de la photosynthèse naturelle, mais les catalyseurs sont à base d'or et d'oxyde d'iridium ; ce procédé n'a donc aucun avenir économique, mais il constitue un point de départ intéressant pour la mise au point de dispositifs plus per-

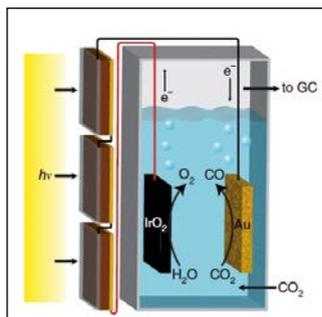


Figure 28

Schéma d'une cellule de réduction du CO₂ en CO à partir d'énergie solaire.

formants et moins chers, notamment à travers l'utilisation de métaux non nobles comme catalyseurs.

4.2.8. Des métaux non nobles pour la réduction catalytique de CO₂

Au laboratoire, nous travaillons par exemple à la mise au point d'électrodes à base de cuivre, un métal non noble. En particulier par des effets de nanostructuration du matériau et par ajout de substrats organiques (cyclame, par exemple) conduisant à des surfaces hybrides, nos catalyseurs possèdent des performances intéressantes pour la réduction électrochimique du CO₂ en acide formique (Figure 29A).

Le rêve est de mettre au point un dispositif dans lequel, en ne mettant que de l'eau et du CO₂ et en l'éclairant, on pourra produire de l'acide formique et du CO, un peu plus tard du méthane, et peut être un jour du glucose, et puis plus tard des systèmes beaucoup plus complexes (Figure 29B) !

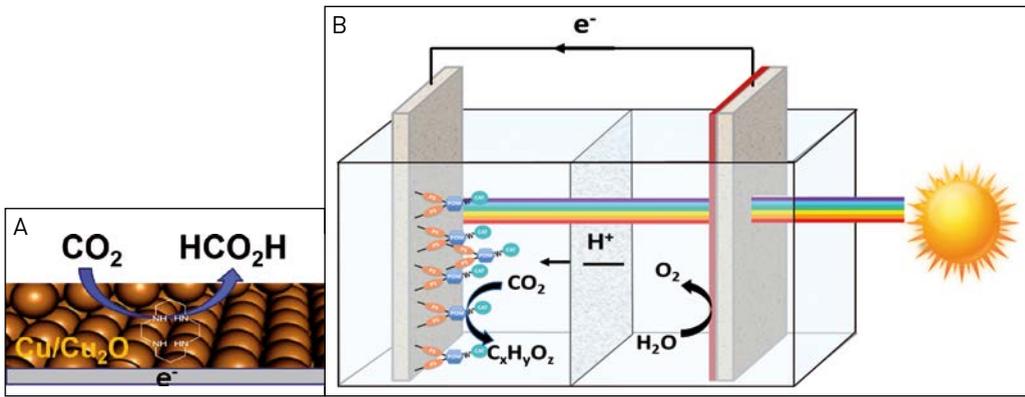


Figure 29

A) Structure du matériau hybride à base de cuivre ; B) cellule de réduction du CO_2 à partir d'énergie solaire.

CO_2 c'est aussi la vie !

« Le carbone est l'élément clé de la substance vivante, mais son entrée dans le monde vivant n'est pas aisée, elle doit suivre un itinéraire obligé... L'atome, accompagné de ses deux satellites qui le maintiennent à l'état de gaz, doit frôler une feuille, y pénétrer et y être fixé par un rayon de Soleil, puis combiné avec de l'hydrogène pour être finalement inséré dans une chaîne, la chaîne de la vie.

Quand nous aurons appris à en faire autant, nous aurons résolu le problème de la faim dans le monde. L'anhydride carbonique, qui constitue la matière première de la vie, la provision permanente dans laquelle puise tout ce qui croît, et l'ultime destin de toute chair, n'est pas un des composants principaux de l'air, mais un ridicule déchet, une impureté... C'est de cette impureté toujours renouvelée que nous venons, nous les animaux, et nous les plantes, et nous l'espèce humaine ».

Ce beau texte, extrait du dernier chapitre « Carbone » de l'ouvrage *Le Système périodique* de Primo Levi, est intéressant pour ceux qui font de la photosynthèse artificielle.

« Quand nous aurons appris à en faire autant, nous aurons résolu le problème de la faim dans le

monde ! ». À l'époque de Primo Levi, le problème à résoudre était la faim dans le monde, ce n'était pas le réchauffement climatique !

Remarquons aussi la dernière phrase caractérisant l'anhydride carbonique : « *c'est de cette impureté toujours renouvelée que nous venons nous les animaux, nous les plantes, et nous l'espèce humaine* ». Nous ne sommes qu'au début de la recherche sur le CO₂, il faut que le monde académique et le monde industriel travaillent ensemble, et il faut investir comme c'est déjà compris et fait par certains pays.

Le ministère de l'Éducation et de la recherche allemande a investi 100 millions d'euros depuis 2009 sur l'utilisation du CO₂ pour la synthèse organique et la production de carburants synthétiques. Aux États Unis, le département de l'énergie investit une centaine de millions de dollars par an sur le programme CO₂. La Chine vient d'annoncer qu'elle va consacrer 4,7 milliards de dollars sur cinq ans pour le recyclage du CO₂ dans les industries du charbon, de l'acier, du ciment et du papier. Il n'y a encore aucun programme spécifique en France.

Actions des entreprises de la chimie au service de la lutte contre le changement climatique

Élu président de l'Union des Industries Chimiques¹ en avril 2012, Philippe Gœbel est également, depuis 2013, vice-président du Comité stratégique de filière (CSF) Chimie et Matériaux.

Bien que deux fois centenaire, l'industrie chimique reste une industrie jeune et essentielle, sur laquelle reposent des pans entiers de notre société. En effet, toutes les nouvelles énergies ou toutes les nouvelles technologies développées pour faire face aux défis actuels n'auraient pu voir le jour sans réactions chimiques ou découvertes des scientifiques du secteur de la chimie. En ce sens, l'industrie chimique est génératrice d'innovation et de développement économique, elle est un déterminant majeur de la compétitivité économique française et un acteur indispensable au maintien du tissu industriel national, et des millions d'emplois qui y sont associés. C'est grâce à la chimie que la France sera en mesure de répondre aux enjeux majeurs du siècle, à savoir les problé-

matiques de changement climatique, de préservation des ressources et de l'environnement, ou encore de transition énergétique.

1 L'industrie chimique doit informer les citoyens sur ses actions

1.1. Le train du climat

L'UIC a été partenaire du train du climat, un événement organisé à l'occasion de la COP 21² (*Figures 1 et 2*). Le

2. COP 21 : COP signifie « *Conferences Of the Parties* » qui désigne des réunions annuelles au cours desquelles les représentants des pays du monde faisant partie de la Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques se réunissent, dans le cadre d'action de lutte contre le réchauffement climatique. La 21^e édition de ces COP a eu lieu à Paris du 30 novembre au 11 décembre 2015.

1. www.uic.fr



Figure 1

L'UIC a été partenaire du train du climat, pour la COP 21.

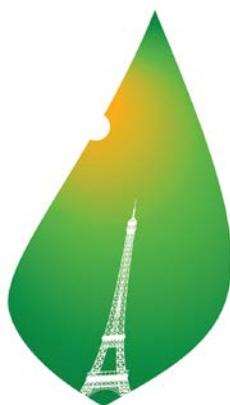


Figure 2

La 21^e édition des COP a eu lieu à Paris du 30 novembre au 11 décembre 2015.

Crédit : SG COP21.

PARIS2015
 CONFÉRENCE DES NATIONS UNIES
 SUR LES CHANGEMENTS CLIMATIQUES
COP21·CMP11

train du climat s'est déplacé dans 19 villes de France et à chaque étape, de nombreux visiteurs ont été étonnés par la présence à bord du train des entreprises de la chimie. Ils ne connaissaient pas les solutions qu'offrent les entreprises de la chimie au défi climatique. En effet, les entreprises de la chimie aident tous les acteurs industriels et économiques à réduire leurs empreintes environnementales. Pour 1 t de CO₂ émise lors de la fabrication d'un produit chimique, entre 2,1 t et 2,6 t de CO₂ sont évitées lors de son utilisation. De solutions en innovations, l'industrie

chimique a réduit sa dépendance aux énergies fossiles, a développé des solutions de mix énergétique...

C'est ainsi que **L'industrie chimique en France a réduit ses émissions de gaz à effet de serre de plus de 50 % depuis 1990.**

1.2. Lancement du mouvement international Responsible Care®

L'industrie chimique a lancé au niveau mondial en 1986 un mouvement international appelé Responsible Care® (Figure 3), qui fut précurseur par rapport à toutes les démarches qui se sont développées par la suite, sous le nom de « Développement Durable ».

La chimie en France s'est associée au Responsible Care® dès 1990. Responsible Care® est un engagement volontaire afin de réduire ce qu'on appelle aujourd'hui son empreinte environnementale, c'est-à-dire produire de manière encore plus respectueuse de notre environnement.

Nous n'avons peut-être pas bien, ou pas assez, su faire savoir et faire comprendre à nos concitoyens, aux politiques et à nos interlocuteurs en général, quelles que soient les parties prenantes, le rôle fondamental que doit jouer l'industrie chimique dans l'économie nationale.

1.3. La place de l'industrie chimique dans l'économie nationale

L'industrie chimique en France (Figure 4) est la

6^e industrie chimique mondiale et la deuxième industrie chimique européenne (la première étant l'Allemagne), et représente plus de 3 300 entreprises. Contrairement à ce qu'on pourrait imaginer, ces 3 300 entreprises ne sont pas des grands groupes mais sont à 90 % des ETI, des PME, voire des TPE³. Elles emploient plus de 203 000 salariés si on ne compte que les

3. TPE (Très Petites Entreprises) : entreprises de moins de 10 salariés. Depuis 2008 la nomination officielle de ces entreprises est « microentreprise » ; PME (Petites et Moyennes Entreprises) : entreprises occupant moins de 250 personnes et ayant un chiffre d'affaire annuel inférieur à 50 millions d'euros (ou un total de bilan n'excédant pas 43 millions) ; ETI (Entreprises de Taille Intermédiaire) : intermédiaire entre les PME et les grandes entreprises, employant entre 250 et 4999 salariés, ou ayant un chiffre d'affaire n'excédant pas 1,5 milliards d'euros (soit un total de bilan n'excédant pas 2 milliards d'euros).



Figure 3

Le mouvement international Responsible Care® a été précurseur des démarches de « développement durable ».



Figure 4

L'industrie chimique en France est la 6^e industrie chimique mondiale et la deuxième industrie chimique européenne.

effectifs directs. Si on prend en compte les emplois induits, il faut multiplier ce chiffre par trois voire quatre.

Le chiffre d'affaire de l'industrie chimique est de 75 milliards, dont plus de 55 milliards réalisés à l'exportation. Il faut aussi souligner que dans notre pays qui connaît un déficit commercial significatif depuis maintenant plusieurs années, la chimie présente un solde de ses échanges extérieurs positif de 7,3 milliards en 2015, malgré la baisse du prix du pétrole. La tendance à l'amélioration semble se confirmer pour 2016.

Enfin, la recherche a toujours été maintenue constante, quels que soient les aléas conjoncturels. En 2008-2009, il y a eu un recul profond de l'activité des entreprises de chimie en France, et malgré cela, l'effort de recherche a été maintenu. Il est actuellement d'environ 1,77 milliard d'euros, ce qui représente 11 % de la valeur ajoutée de nos entreprises. Plus de 12 500 personnes, dont 5 576 chercheurs, travaillent en R&D sur le territoire national.

Les deux caractéristiques de l'industrie chimique en France (valables pour d'autres industries chimiques dans le monde), et qui font partie de notre patrimoine génétique, sont que nous sommes à la fois innovateur et exportateur. C'est grâce à ces deux qualités que, mieux que d'autres secteurs industriels français, nous avons su traverser la crise qui s'est produite en 2008-2009, et qui quelque part fait encore sentir ses effets aujourd'hui.

Mieux traverser la crise veut dire arriver à un volume d'activité de +6 % par rapport à son meilleur niveau d'avant-crise (c'est-à-dire en 2007), alors que l'industrie française aujourd'hui est en diminution de -16 %. Ce chiffre n'est pas extraordinaire, mais est au moins positif là où l'ensemble est au négatif.

On a coutume de dire que la chimie est l'industrie des industries. Fondamentalement, toutes les productions de l'industrie chimique irriguent la plupart des grands secteurs industriels, ainsi que l'agriculture, la pêche, le bâtiment et les travaux publics.

Il n'existe pas au monde d'exemple d'économie forte sans une industrie forte. Il suffit de regarder autour de nous, et d'abord l'Allemagne, où l'industrie pèse 24 % du produit intérieur brut, face à 12 % pour la France. De même, il n'y a pas d'industrie forte sans industrie chimique forte : l'industrie chimique allemande est la première industrie chimique en Europe et fait partie du top trois des industries chimiques mondiales.

Quand on regarde le mode de développement des pays émergents (d'abord la Chine, mais aussi l'Inde, le Brésil ou l'Afrique du Sud), tous appuient leur développement d'une manière générale sur une industrie importante, et en particulier sur une industrie chimique puissante.

L'industrie chimique joue donc un rôle essentiel dans l'économie nationale, ce qui la met aussi en face de responsabilités importantes. C'est à nous de faire savoir en permanence

quel est son rôle, et de lutter contre les idées reçues, notamment cette image d'industrie polluante et dangereuse. Il faut notamment faire savoir que, sans la chimie, on ne trouvera pas les solutions qui permettront de lutter contre le changement climatique.

Ce combat de « lutte contre le changement climatique », nous le menons à deux niveaux : d'abord au niveau de nos propres installations (en produisant différemment afin que notre empreinte environnementale se réduise), et ensuite, et c'est sans doute le plus important en termes d'effet au niveau de nos clients tels que l'industrie automobile, l'industrie aéronautique, l'électronique, l'électricité, le bâtiment et les travaux publics, en leur fournissant des solutions qui vont leur permettre à leur tour de réduire leur empreinte environnementale et de réduire *in fine* l'empreinte environnementale de leurs propres clients.

2 La réduction de l'empreinte environnementale au sein des entreprises de la chimie

D'indéniables progrès ont été réalisés depuis les années 1990 : dans un pays comme la France où les émissions de gaz à effet de serre ne représentent que 1 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre, la chimie ne représente aujourd'hui plus que 5 % des émissions de gaz à effet de serre. Cela correspond à une réduction de nos émissions

de 25 millions de tonnes de CO₂ en un peu plus de vingt ans, soit la moitié de l'effort qui était demandé à la France dans le cadre du protocole de Kyoto⁴.

2.1. Les moyens mis en œuvre pour réduire les émissions de CO₂

La réduction ne résulte pas d'une diminution de la production, qui est de 5 % supérieure à ce qu'elle était avant la crise de 2007, mais du travail sur l'ensemble des éléments qui constituent la chaîne de production.

2.1.1. La réduction de la consommation d'énergie

Elle peut être illustrée par l'exemple récent d'une grande plateforme chimique où la vapeur est produite de manière propre à partir de déchets de bois dont plus de 85 % de l'énergie contenue est valorisée.

Nous travaillons aussi sur l'amélioration des performances de nos procédés pour les rendre moins consommateurs de matière, moins consommateurs d'énergie et moins émetteurs de rejets d'une façon générale. Un adhérent de l'UIC a, depuis quelques années, déployé sur l'ensemble de ses sites des éco-procédés. En 2014, ses consommations d'énergie ont pu, grâce à ces démarches, baisser de 10 % (Figure 5).

4. Protocole de Kyoto : accord international signé en 1997, visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre et dont les participants se réunissent une fois par an depuis 1995.



Figure 5

Grâce à des efforts d'amélioration des procédés, les consommations d'énergie ont pu baisser de 10 %.

2.1.2. Les bâtiments et le transport

La mise en place de bâtiments éco-efficients et le choix, pour le transport de nos produits, de modes de transport moins émetteurs de CO₂ et plus sobres en carbone font partie de la politique des entreprises de la chimie.

Cela devrait se traduire par une préférence du fluvial et du ferroviaire au transport par route. Cette mutation demeure un travail de longue haleine. En effet, au cours des dix dernières années, le transport ferroviaire en France a malheureusement diminué d'environ 30 % pour des raisons de coûts et de flexibilité, contrairement à l'Allemagne où il a augmenté d'environ 40 %.

3 Les entreprises de la chimie au service de la diminution de l'empreinte environnementale des clients

Les entreprises de la chimie mettent à la disposition de leurs clients des solutions innovantes pour leur permettre à leur tour, d'une part de réduire leur consommation de matière et d'énergie, et d'autre part de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre (*Figure 6*).

Une étude réalisée il y a quelques années par un cabinet de conseils montre qu'à chaque fois qu'on émet une tonne de CO₂ pour produire un produit chimique conçu dans ce but, cela permet d'éviter en aval l'émission de 2 à 2,5 tonnes de CO₂ par rapport aux solutions alternatives qui auraient dû être employées

si ce produit chimique n'avait pas existé.

Plusieurs grands secteurs sont concernés par les problématiques de développement durable et d'émission de CO₂, notamment les transports, l'habitat, les matériaux verts, les énergies renouvelables et l'économie circulaire.

3.1. Les transports⁵

Rappelons qu'il n'y a pas si longtemps, l'objectif en matière de consommation pour les véhicules était de descendre à 6 litres aux 100. Parmi les 34 plans industriels lancés en 2013, l'un d'eux s'appelait déjà « Le véhicule de 2 litres aux 100 » ; il n'y a pas de doute que ce but sera atteint.

Les industriels de la chimie ont leur place dans la réalisation de ce défi, et ce, de différentes manières :

- en mettant à la disposition des motoristes des lubrifiants qui permettent d'améliorer les performances et les durées de vie des moteurs ;
- en continuant à améliorer les performances mécaniques des matériaux de synthèse plus légers tels que les thermoplastiques composites qui sont issus de nos fabrications et qui peuvent être assemblés par les constructeurs automobiles grâce à des colles de structure qui, elles aussi, ont réalisé des progrès considérables ;
- en améliorant les caoutchoucs de synthèse pour

5. Voir aussi *Chimie et transports, vers des transports décarbonés*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2014.



Figure 6

La chimie apporte des solutions innovantes pour réduire l'empreinte environnementale.

les nouveaux pneumatiques qui, en présentant moins de résistance au roulement, permettent aux véhicules automobiles de réduire leur consommation.

Ces exemples sont centrés sur l'automobile, mais on pourrait aussi citer l'aéronautique, où l'implantation de fibres de carbone, en particulier dans les avions, a permis de réduire considérablement les consommations de kérosène.

3.2. L'habitat durable⁶

L'habitat est, en France, responsable de 20 % des émissions de gaz à effet de serre et de 40 % de la consommation d'énergie. Dans ce domaine également, les produits de la chimie permettent d'intervenir par exemple sur l'efficacité énergétique des bâtiments, ou sur la qualité sanitaire avec des peintures dépolluantes.

Citons l'exemple des vitrages intelligents qui résultent des recherches de développement de la fonctionnalisation des matériaux : on introduit dans les vitrages certaines propriétés grâce à des radicaux souvent chimiques qui vont permettre de remplir certaines fonctions, et au total de minimiser les consommations d'énergie.

Dans le futur, un autre objectif est de fabriquer des isolants extrêmement fins qui permettront d'isoler les bâtiments à partir de l'intérieur tout en minimisant pratiquement to-

talement les consommations d'espace, c'est-à-dire sans empiéter sur l'espace utile pour les habitants.

3.3. Les matériaux verts et la chimie du végétal

Depuis plusieurs années, la chimie du végétal se développe. La chimie du végétal, comme son nom l'indique, est la chimie qui est issue des matières renouvelables issues de la biomasse, par opposition aux ressources fossiles (pétrole, gaz,...).

L'UIC s'est beaucoup engagée dans le développement de la chimie du végétal et est à l'origine de l'Association Chimie du Végétal⁷ (ACDV) à laquelle participent beaucoup de ses adhérents. Aujourd'hui, cette chimie du végétal parvient même à fabriquer des matériaux aux propriétés améliorées.

En 2008, les industries chimiques ont pris l'engagement de doubler la part des matières premières d'origine renouvelable dans leurs intrants entre 2008 et 2017. L'engagement est tenu et nous sommes confiants sur le fait qu'en 2017, 15 % des matières premières utilisées par l'industrie chimique seront d'origine renouvelable.

Cela peut sembler faible mais de nombreux facteurs techniques et économiques entrent en ligne de compte, et il est clair que la division par deux du prix du pétrole ne renforce pas la compétitivité des solutions renouvelables.

6. Voir aussi *Chimie et habitat*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2011.

7. www.chimieduvegetal.com

Il ne faut pas confondre chimie du végétal et chimie verte⁸. La chimie verte, concept créé dans les années 1990, est une chimie qui obéit à 12 principes de base dont l'un d'entre eux est d'utiliser des matières d'origine renouvelable, donc la chimie du végétal. Les 11 autres principes sont des principes de ce qu'on peut appeler la « chimie durable », celle qui est appelée à exister dans la durée, parce qu'elle minimise ses consommations et son empreinte environnementale, et qu'elle cherche à déployer des procédés éco-efficents, qui consomment moins de matière et moins d'énergie. La chimie verte englobe donc la chimie du végétal.

Par exemple, quand on met au point des systèmes membranaires qui permettent de produire une eau 40 % plus pure en consommant 30 % moins d'énergie, on est au

cœur de la chimie verte. Et l'on continuera donc de faire de la chimie verte.

3.4. Les énergies renouvelables⁹

La France s'est fixé des objectifs ambitieux : en 2030, dans le cadre de la loi de transition énergétique, 32 % de la consommation primaire d'énergie devra être d'origine renouvelable, ce qui est un défi qui suppose des investissements, du travail et surtout des améliorations de performances importantes (*Figure 7*). Quand on pense énergie renouvelable, le photovoltaïque et l'éolien arrivent en tête, mais on oublie d'autres solutions alternatives.

3.4.1. Les panneaux photovoltaïques

Un panneau photovoltaïque est aujourd'hui un concentré

8. Voir aussi *Chimie et expertise, santé et environnement*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2016.

9. Voir aussi *Chimie et enjeux énergétiques*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2013.

Figure 7

La France s'est fixé des objectifs ambitieux en 2030 dans le cadre de la loi de transition énergétique : 32 % de la consommation primaire d'énergie doit devenir énergie renouvelable.



de produits et de matériaux qui sont issus de la chimie. L'amélioration des performances, des rendements et des coûts de production viendront essentiellement d'innovations développées au sein de nos entreprises.

3.4.2. L'énergie éolienne

Pour l'éolien, les problématiques posées aux industries de la chimie sont similaires et concernent la résistance, les propriétés mécaniques et l'allègement de matériaux pour fabriquer des pales plus performantes et plus légères. L'amélioration des propriétés des matériaux par nanostructuration¹⁰ ou par réalisation de composites aidera aussi à améliorer la performance de l'énergie éolienne.

3.4.3. Le stockage de l'énergie

Le stockage est un défi incontournable si on veut réussir le développement des énergies renouvelables. Tant qu'on ne saura pas résoudre de façon économiquement performante la question du stockage de l'électricité (voir le **Chapitre de Y. Bréchet** dans cet ouvrage *Chimie et changement climatique*, EDP Sciences, 2016), il sera toujours difficile de développer aussi vite qu'on le souhaiterait les énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables sont intermittentes par nature : s'il n'y a pas de Soleil ou s'il n'y a pas de vent, il n'y a pas d'électricité. Quand il y a du

Soleil ou quand il y a du vent, il y a de l'électricité, mais en général, il y en a trop à ce moment-là (voir ce qui se passe chez nos voisins allemands). Il faut donc stocker cette énergie, pour pouvoir la réutiliser quand on en a besoin, la nuit par exemple.

La question du stockage de l'énergie est une question qui implique beaucoup nos entreprises, et c'est un enjeu majeur de notre société pour réussir la lutte contre le changement climatique (voir les **Chapitres de S. Candel, M. Fontecave, J. Legrand et J.-C. Bernier** dans *Chimie et changement climatique*).

3.4.4. L'hydrogène

Quand on parle d'énergie renouvelable, il faut aussi évoquer la question de l'hydrogène (voir le **Chapitre de P. Mauberger** dans *Chimie et changement climatique*) car il n'y aura pas qu'une seule solution pour faire face au mix énergétique dont nous aurons besoin dans les années qui viennent. Quand on parle d'énergie, il faut tenir compte du changement climatique mais aussi des besoins croissants en énergie de la planète.

3.4.5. Le bilan carbone et le mix énergétique

Si on veut rester en dessous de ces 2 °C d'élévation de température, il faut, comme cela a été montré dans d'autres chapitres de cet ouvrage, tenir compte de ce qu'on appelle le bilan carbone. Et aujourd'hui, on ne peut plus émettre que 1 000 milliards de tonnes de CO₂, d'après les experts du GIEC. Les émissions mondiales étant aujourd'hui de

10. Nanostructuration : une nanostructure est un assemblage d'atomes ou de molécules dont au moins une dimension est comprise en 0,1 et 100 nanomètres.

50 milliards de tonnes par an, si on ne fait rien, en vingt ans, l'avenir de notre planète est compromis...

Il faut donc réduire très rapidement les émissions, mais en même temps, nous devons tenir compte du fait qu'aujourd'hui, 1,3 milliard de personnes sur Terre n'ont pas encore accès à l'électricité, et qu'il y a le double de personnes qui utilisent encore la biomasse pour préparer leurs repas et dans des conditions qui font que l'OMS évalue à 4 millions par an le nombre de décès provoqués par des problèmes de qualité de l'air.

Il faut aussi pouvoir faire face à cette demande potentielle, car ce n'est pas parce que cela fait des années que nous bénéficions d'un confort et d'une

qualité de vie importante que nous sommes autorisés à en priver ceux qui n'y ont pas accès aujourd'hui.

Pour y parvenir, il ne faut pas opposer les énergies les unes aux autres ; nous avons besoin de toutes les formes d'énergie. Bien entendu, il faut développer les énergies renouvelables, mais vouloir se passer de l'énergie nucléaire qui n'est pas émissive n'est pas réaliste pour tenir cet objectif de 2 °C.

De plus, même les ressources fossiles ne sont pas toutes égales : quand on produit un kilo-watt-heure avec du charbon, on émet environ deux fois plus de CO₂ que quand on le produit avec du gaz. Il y a donc urgence à remplacer les centrales thermiques les moins performantes fonctionnant au charbon par des centrales au gaz. Plus on attend, plus le bilan carbone qui nous reste à consommer est limité. Il faut donc agir très rapidement.

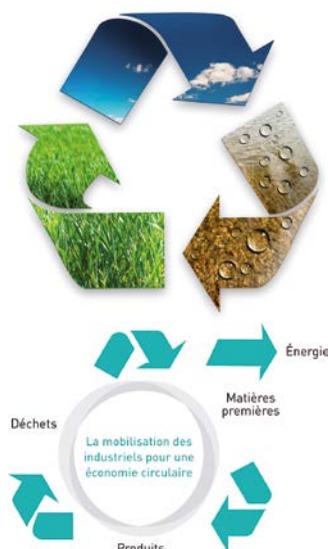


Figure 8

Recycler, réutiliser des produits, leur donner une nouvelle vie... L'économie circulaire fait partie des objectifs européens.

3.5. L'économie circulaire

L'économie circulaire mobilise les industriels de la chimie (**Figure 8**). L'économie circulaire figure dans la loi de transition énergétique adoptée en juillet 2015 en France, mais fait aussi partie de la politique énergétique européenne.

Il est raisonnable et sain de recycler autant que possible, de réutiliser des produits, de leur donner une nouvelle vie, et cela suppose également des procédés et des produits mis au point par l'industrie chimique.

La lutte contre le changement climatique : une opportunité pour l'industrie chimique

L'industrie chimique ne voit pas cette lutte contre le changement climatique comme une menace, mais vraiment comme une véritable opportunité, parce qu'on ne trouvera des solutions que si on fait appel à l'industrie chimique.

La COP 21 a débouché sur un accord qui permettra, en tout cas en ce qui concerne les principales zones émettrices, de placer tous les pays sur un pied d'égalité, dès 2020, puisque le protocole de Kyoto s'étend de 1990 à 2020.

Il est difficile de mettre en place un prix unique du carbone au niveau mondial, tout simplement parce que les situations économiques sont trop différentes entre les différentes zones du monde. En revanche, s'il y avait déjà un club des États qui parvenait à s'entendre pour mettre en place « des mécanismes de carbone » là où il n'y en a pas encore, on ferait un grand pas en direction de la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre.

Ces mécanismes peuvent prendre diverses formes : cela peut être une taxe, ou, comme en Europe, un système d'échange de quotas. Mais encore faut-il que ces mécanismes soient mis en place de façon globale, qu'ils permettent d'avoir un niveau de règles du jeu qui soit le plus égal possible entre les différentes zones, pour permettre à la chimie européenne et à la chimie française de rester compétitive et de pouvoir continuer à innover et à produire des innovations et des solutions qui permettront, dans la durée, de lutter contre le changement climatique.

Prix du baril et énergies renouvelables

Jean-Claude Bernier est professeur Émérite de l'université Louis Pasteur de Strasbourg. Il a été directeur de l'École de chimie de Strasbourg, puis directeur du Département de chimie du CNRS.

Deux questions se posent en reconstituant la saga des énergies renouvelables faites de chimie et d'innovation :

1 - Pourquoi des énergies renouvelables alors que des énergies fossiles bon marché sont disponibles ?

2 - Alors que les énergies renouvelables se sont développées lorsque le prix du pétrole s'envolait, que va-t-on observer quand ce prix s'écroule ?

1 Le prix du baril

1.1. Conséquence sur les recherches scientifiques

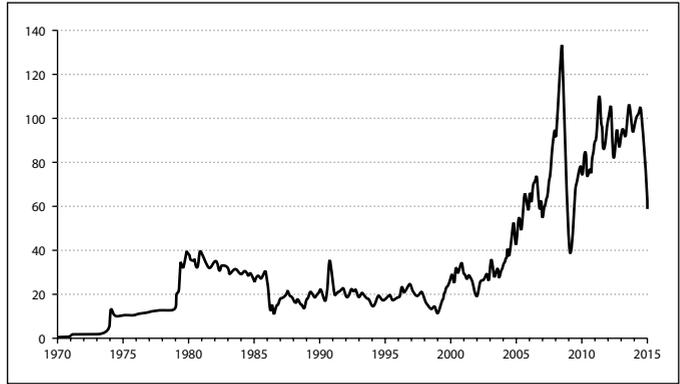
De 1970 à 2015, c'est plus de quarante ans d'histoire du prix du baril soumis aux aléas géopolitiques (**Figure 1**). Le premier choc pétrolier en 1974 fait passer le prix du baril de quelques cents à 10 dollars ; le responsable est l'OPEP (Organisation des pays

exportateurs de pétrole), qui limite la production et persiste en 1979 lors du second choc pétrolier lorsque le prix passe de 10 \$ à 40 \$. À ce moment, le monde politique et le monde scientifique se disent qu'il faut trouver une parade. La France lance son programme de centrales nucléaires. Mais brutalement après 1986, c'est la chute des prix avec quelques soubresauts de 1987 à 2002, avec une valeur moyenne de 20 \$ le baril, c'est le contre-choc pétrolier. Les débuts d'innovations sur le photovoltaïque et les énergies décarbonées sont mises en sommeil. Après 2002, le prix du baril subit une montée qui suit la demande, excédant à nouveau la production jusqu'au sommet de 2008, puis une stabilisation à quelques 100 \$, c'est le troisième choc pétrolier.

Cette histoire a des répercussions sur la recherche,

Figure 1

Chocs pétroliers et chute brutale du prix du baril en 2015.

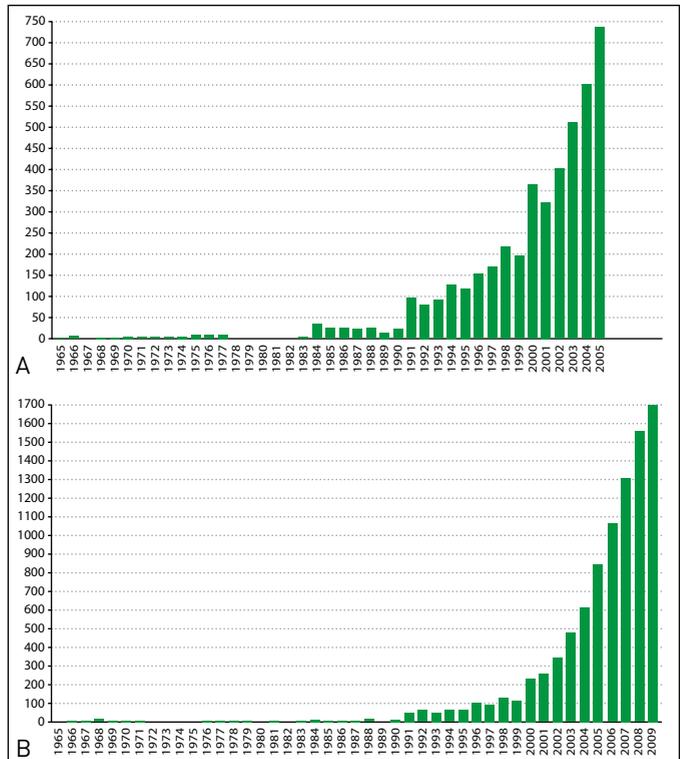


notamment en chimie, qui se décèle en regardant le nombre de publications scientifiques (Figure 2A et 2B). Le nombre de publications sur le silicium photovoltaïque, d'abord timide dans les années 1970, puis quasi nul durant le contre-choc, remonte dans les années 1990

et 2000, pas seulement poussé par le niveau de prix du baril mais aussi par une demande sociale et économique sur les énergies renouvelables, car le « global change » commence à tourner dans les esprits. Même chose pour l'hydrogène, sacré vecteur énergétique du futur

Figure 2

A) Multiplication parallèle du nombre de publications sur les propriétés photovoltaïques du silicium ; B) explosion parallèle du nombre de publications sur l'hydrogène.



dans les années 1970, mais avec un calme plat des publications qui ne redémarrent vraiment qu'après les années 1990 et 2000 pour les raisons déjà exposées.

1.2. La prise de conscience du « global change »

Après 1990, il commence à y avoir une prise de conscience d'un changement climatique non seulement chez les « climatologues » du GIEC¹ mais aussi dans le grand public et la communauté scientifique. Les relevés de concentrations de gaz à effet de serre avec les fameuses courbes en forme de « crosse de hockey » très médiatisées montrent une augmentation régulière depuis l'ère industrielle (1850) du gaz carbonique CO_2 , du méthane CH_4 et du protoxyde d'azote N_2O . Le CO_2 en particulier, directement issu de la

combustion du pétrole, atteint en 2015 un niveau de 400 ppm, très élevé (Figure 3).

Deuxième prise de conscience, les ressources fossiles de charbon, de gaz et de pétrole, accumulées en sous-sol par réactions biochimiques depuis des millions d'années, ne sont pas éternelles et risquent d'être galvaudées en quelques centaines d'années. Inévitablement dans l'histoire arrivera un moment où la demande dépassera la production et qu'un plateau, ou « peak oil », sera atteint, et il faudra bien trouver une solution palliative. Pour le pétrole traditionnel, le répit est de l'ordre de 40 ans, il recule depuis plusieurs années quand on fait appel aux ressources additionnelles comme l'huile de schiste et les sables bitumineux. Pour le gaz, c'est 100 ans, le charbon 200 ans, mais c'est inexorable un jour il n'y aura plus rien !

1. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) est un organisme intergouvernemental, ouvert à tous les pays membres de l'ONU. Il « a pour mission d'évaluer, sans parti-pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les risques liés au réchauffement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation. Il n'a pas pour mandat d'entreprendre des travaux de recherche ni de suivre l'évolution des variables climatologiques ou d'autres paramètres pertinents. Ses évaluations sont principalement fondées sur les publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue ».

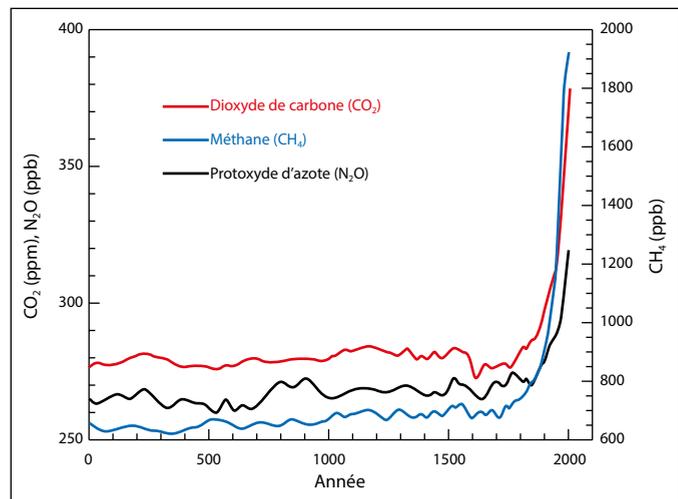
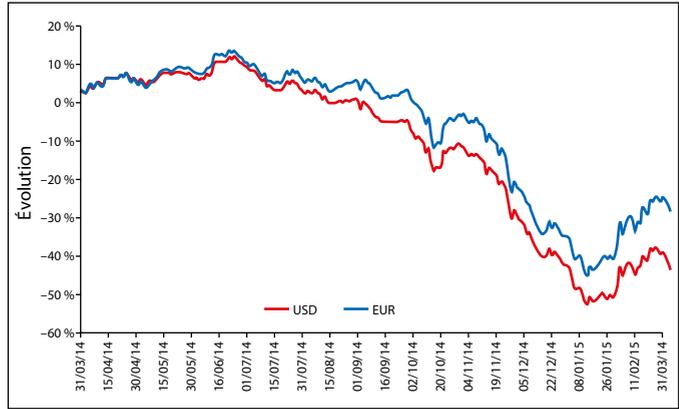


Figure 3

Variation des teneurs en CO_2 , en CH_4 et en N_2O depuis les débuts de l'ère industrielle.

Figure 4

Évolution du pétrole en dollar et en euros. On note une chute brutale : le contre-choc pétrolier.



1.3. La chute

Arrive fin 2014 et en 2015 de façon presque inattendue la chute brutale du prix du baril. Elle est expliquée après coup par les économistes, la demande de la Chine s'essouffle fortement, la production américaine en gaz et huiles de schiste gonfle l'offre. L'Arabie Saoudite ne veut pas baisser la sienne car elle veut garder ses marchés que la Russie et l'Iran lorgnent. La conséquence, une dégringolade du prix de plus de 60 %, de 100 à 40 \$, et en 2016 une valeur comprise entre 30 et 40 \$ (Figure 4).

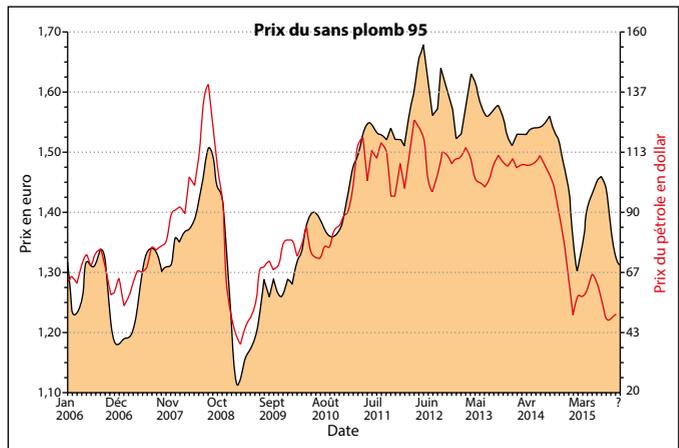
2 Les conséquences liées à la chute du prix du baril

2.1 Conséquences positives pour les particuliers et les économies européennes

Qui peut profiter de cette baisse ? D'abord nous les consommateurs. Le prix de l'essence diminue à la pompe. L'américain moyen avec son gros pick-up va économiser environ 1 000 \$ par an, le français avec son automobile plus petite et les taxes sur les carburants qui ne bougent pas, bien moins, environ 200 €. Les habitants qui

Figure 5

Évolution du prix du sans plomb 95 durant les dix dernières années.



se chauffent au fioul voient leur facture baisser d'environ 30 % par rapport à celle de 2014. Les compagnies aériennes, quoi qu'elles en disent, renouent avec les bénéfiques conséquences de la baisse des prix du kérosène. Les économies européennes en ont également profité, car les pays européens sont plutôt importateurs de pétrole. En France, en 2015, pour les entreprises, c'est de 2 à 3 milliards de bonus, à peu près autant que le CICE (Crédit d'impôt pour la compétitivité et l'emploi) (Figure 5).

En ce qui concerne la chimie et l'automobile, la compétitivité a permis une croissance continue du chiffre d'affaire et des marges. Car ce sont des industries exportatrices, et la chimie, à 90 % pour la chimie organique, c'est le naphta et donc le pétrole qui constitue la matière première : sa baisse fait aussi baisser les coûts (Figure 6).

2.2. Conséquences négatives pour la majorité des producteurs

Qui n'en profite pas ? Bien sûr, les pays producteurs de pé-

trole (Figure 7) ; le Venezuela où le PIB dépend à 80 % du pétrole, la Lybie, l'Algérie et même la Russie dont les exportations et ventes du pétrole et du gaz sont une part importante de l'économie. Pour ces pays, l'inflation et la baisse du niveau de vie sont effectives. L'Arabie Saoudite, avec ses réserves de pétrodollars, ne souffre pas trop mais a voté en 2016 un budget en déséquilibre.

Deuxième cible, les parapétroliers (Figure 8). Au-delà de 2 000 mètres, les forages profonds ne sont plus rentables, donc nombre de plateformes offshore s'arrêtent et licencient. Pour les pétroliers, on met la pédale douce sur l'exploration, et les sondeurs souffrent, Schlumberger et CGG, et même Vallourec, spécialisé dans les tubes des puits, engagé des plans d'économie.

Les pétroliers qui n'ont pas su se diversifier dans d'autres énergies, ainsi que les pétroliers non conventionnels, souffrent également. Les grands champs d'huile de schiste aux États-Unis d'Eagle-Ford ou Bakken

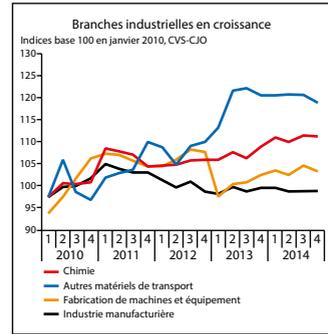


Figure 6

Le profit des économies européennes intimement lié à la baisse du prix du pétrole et à la dépréciation de l'euro.

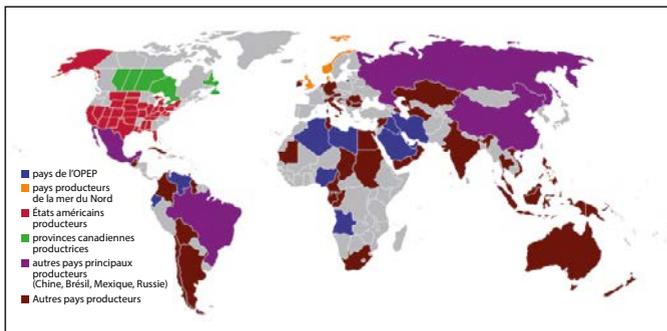


Figure 7

Les pays producteurs de pétrole.



Figure 8

Vers une récession des plateformes pétrolières.



Figure 9

Recensement des forages exploités aux États-Unis. On observe une chute en 2015.

peuvent encore s'en sortir à 55 \$ le baril. Mais les petits producteurs qui ont emprunté pour installer des puits sur leurs propriétés sont obligés de produire même à perte pour rembourser leurs emprunts. Près de 60 % des puits d'huile de schiste ont fermé en 2015, et l'on peut craindre le pire pour 2016 (Figure 9).

3 Qu'en est-il pour les énergies renouvelables ?

3.1. L'essor de la production électrique

La question en 2015 est donc celle-ci : avec cette baisse

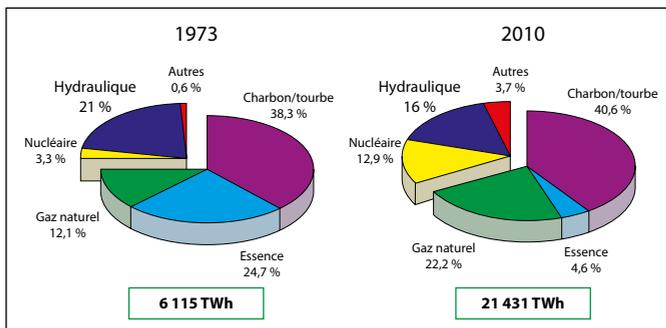


Figure 10

Évolution des sources de production électrique entre 1973 et 2010.

du prix du baril, allons-nous assister, comme après le contre-choc pétrolier des années 1980, à une baisse de l'innovation et des investissements dans les autres sources d'énergie ? Ou encore : à 30-40 \$ le baril, va-t-on tuer les énergies renouvelables ? (Figure 10)

Heureusement l'histoire ne balbutie pas toujours. La comparaison de la production électrique en 1973 et en 2015 montre de réelles différences. Nous sommes tous d'affreux consommateurs d'énergie et donc d'électricité, dont la production mondiale a été multipliée par quatre en quarante ans. Mais dans le même temps, la production par les centrales thermiques au fioul a été divisée par cinq, sa part est passée de 25 % à 5 %. Cette production est donc devenue marginale qui fait que ce nouveau « contre-choc » n'aura qu'une influence limitée. Notons cependant que c'est assez différent pour le charbon et le gaz, dont la part a bien augmenté.

3.2. Le photovoltaïque

Parallèlement, la production d'électricité photovoltaïque a bénéficié des baisses continues des prix des matières premières ; l'argent a baissé de 60 %, le cuivre également, et la production de silicium polycristallin, où la chimie intervient prioritairement, augmente régulièrement de près de 40 000 tonnes par an, avec un prix du silicium qualité photovoltaïque proche de 40 \$/kg. Les panneaux photovoltaïques ont bénéficié de ces baisses et de l'offre sur

le marché. Le watt crête (Wc) a pratiquement été divisé par trois en six ans, et il est proche de 1 \$ en 2015. Pour les particuliers, une installation de panneaux d'une moyenne de 3 kWc revient environ à 12 000 €, alors qu'en 2010 son prix avoisinait 20 à 24 000 €. Ces installations sont encore encouragées par l'État, qui oblige l'opérateur EDF à racheter les kWh produits à des tarifs avantageux qui sont modulés en fonction de la puissance et qui baisseront progressivement jusqu'en 2020 (Figure 11).

Les prix de rachat par l'opérateur sont en train de croiser les prix de vente qu'il pratique. C'est déjà fait en Allemagne où le prix pour les particuliers est soumis à la taxe EEGU qui est de 9,8 cc€/kWh, qui donne un prix moyen pour le consommateur de l'ordre de 28 cc€/kWh. En France, nous avons la taxe CSPE (Contribution au service public de l'électricité), qui est de 2,2 cc€/kWh, qui ne rapporte rien à l'opérateur mais à l'État pour encourager le photovoltaïque et l'éolien. Ces taxes qui doivent subventionner les énergies renouvelables ont rapporté 8 Mrds€ en Allemagne et de l'ordre de 6 Mrds€ en France, qui garde malgré tout un prix de 12 cc€/kWh, moins de la moitié du prix outre-Rhin.

Les moyens financiers des États et la baisse du prix des installations ont largement contribué aux investissements dans les moyens de production de l'électricité solaire ou éolienne. En Allemagne le photovoltaïque revendique une puissance installée de

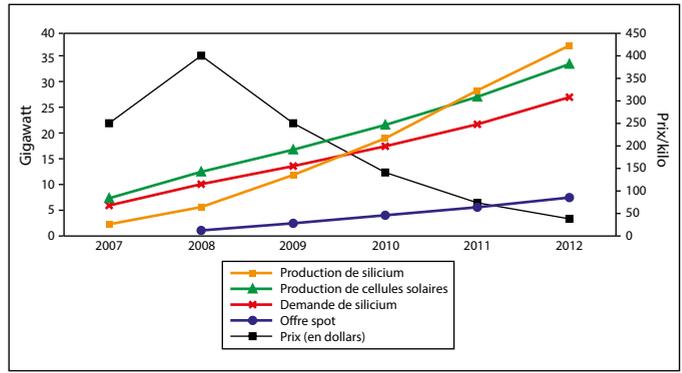


Figure 11

Évolution de la production et du prix des matières premières pour le photovoltaïque.

8 800 MW, produisant par an 157 TWh, soit l'équivalent de quatre à cinq réacteurs nucléaires. En France, 1,2 % de la production électrique métropolitaine est d'origine solaire, l'objectif pour 2020 est d'arriver à 8 000 MW installé. Ce sont évidemment les départements les plus au sud qui contribuent le plus à la production (Figure 12).

Dans le monde, les investissements programmés dès 2012 continuent (Figure 13), et de nouveaux sites démarreront

Figure 12

Parc photovoltaïque raccordé aux réseaux par région au 30 juin 2014.

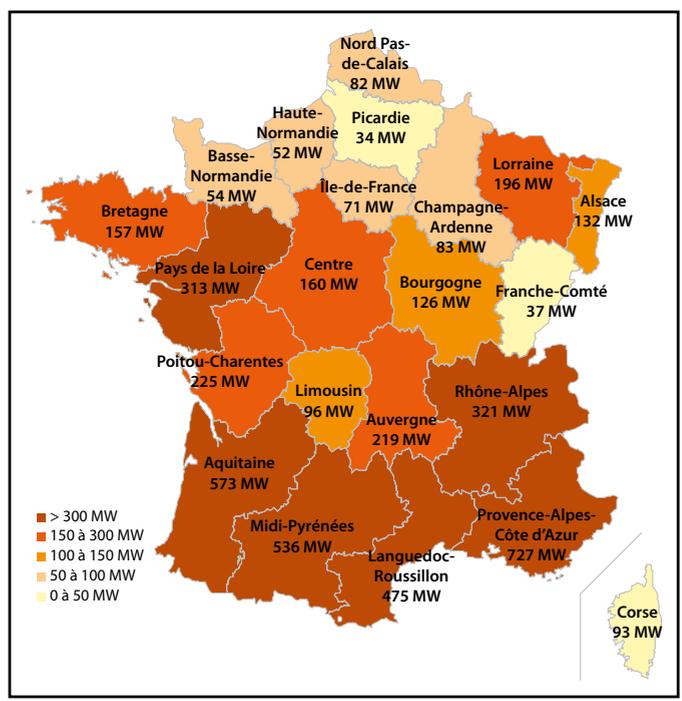




Figure 13

L'essor des champs photovoltaïques.

en 2016 et 1017, comme les grands champs en Californie et dans le désert de Gobi. En France s'est achevé en 2015 le plus grand champ photovoltaïque de 250 ha à Cestas près de Bordeaux.

3.3. L'éolien

Pour les éoliennes, les progrès de la chimie des composites permettent de mouler des pales très solides de plus de 60 mètres, pesant près de 16 tonnes. Les éoliennes de 5 MW culminant à plus de 200 mètres sont devenues courantes. De même, l'utilisation de moteurs à aimants à base de NdFeB a permis de miniaturiser les nacelles et d'améliorer le rendement des génératrices. Les parcs offshore (Figure 14) loin des côtes se multiplient devant la résistance des populations, souvent critiques quant à la modification du paysage sur Terre. Comme pour le solaire, la production en série a permis de faire baisser les prix d'installation et d'arriver à un

prix de l'ordre de 85 € le MWh terrestre et environ 150 € pour l'offshore. Le Royaume-Uni est particulièrement actif en ce domaine et atteint 10,8 % de la production.

3.4. L'intermittence

Il reste un problème à résoudre pour l'énergie électrique renouvelable : l'intermittence de production. Pour une génératrice éolienne, la puissance nominale n'est atteinte que lorsque la vitesse du vent est comprise entre 20 et 90 km/h, c'est-à-dire que le taux de charge effectif est de l'ordre de 20 % (22 % en offshore), correspondant à 1 600 h de fonctionnement par an (Figure 15).

Pour le photovoltaïque, il faut du Soleil, la production est donc interrompue la nuit et lors des passages de nuages. Le taux de charge est ici de 14 %, soit environ un fonctionnement nominal de 1 200 h par an.

Il faut donc que le réseau puisse s'adapter à ces variations parfois brutales et « lis-



Figure 14

Éoliennes offshore.

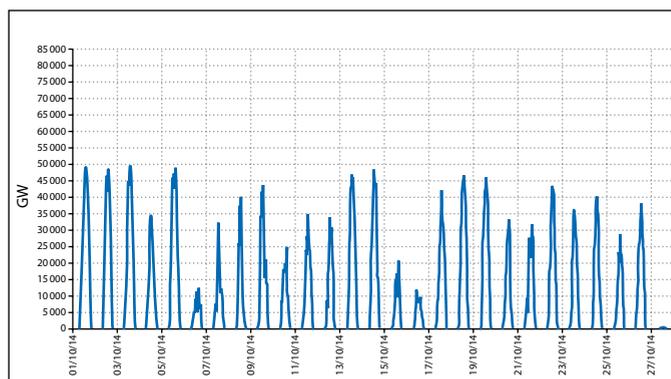


Figure 15

Intermittence de la production d'un champ d'éoliennes sur un mois.

ser » autant que possible la puissance véhiculée. Il y a donc en accompagnement des centrales thermiques au gaz ou au charbon auxquelles on peut faire appel pour pallier le déficit de production. Il est donc paradoxal de constater que les pays les plus vertueux en matière d'électricité décarbonée ne sont pas ceux qui ont le plus investi sur le photovoltaïque ou l'éolien.

En effet, si on compare les pays d'Europe (Figure 16), alors qu'en France l'électricité décarbonée atteint le taux de 92 % grâce au nucléaire et à l'hydraulique, au Royaume-Uni il atteint péniblement 30 %, et en Allemagne il est sous 40 %. Le cas de l'Allemagne est illustratif car, avec

la décision de fermer les centrales nucléaires et d'intensifier l'effort sur le solaire et l'éolien, le nombre de centrales thermiques a été multiplié, notamment pour brûler le charbon « sale », la lignite, ressource nationale bon marché qui produit 46 % de l'électricité outre-Rhin avec un bilan d'émission de CO₂ de 300 MT/an, à comparer aux 52 Mt/an pour la France.

Comment pallier les variations du réseau et l'intermittence de production ? Lorsque le prix du rachat du kWh par l'opérateur croise son prix de vente, il faut auto-consommer sa production. Pour le photovoltaïque, stocker la production du milieu de la journée et uti-

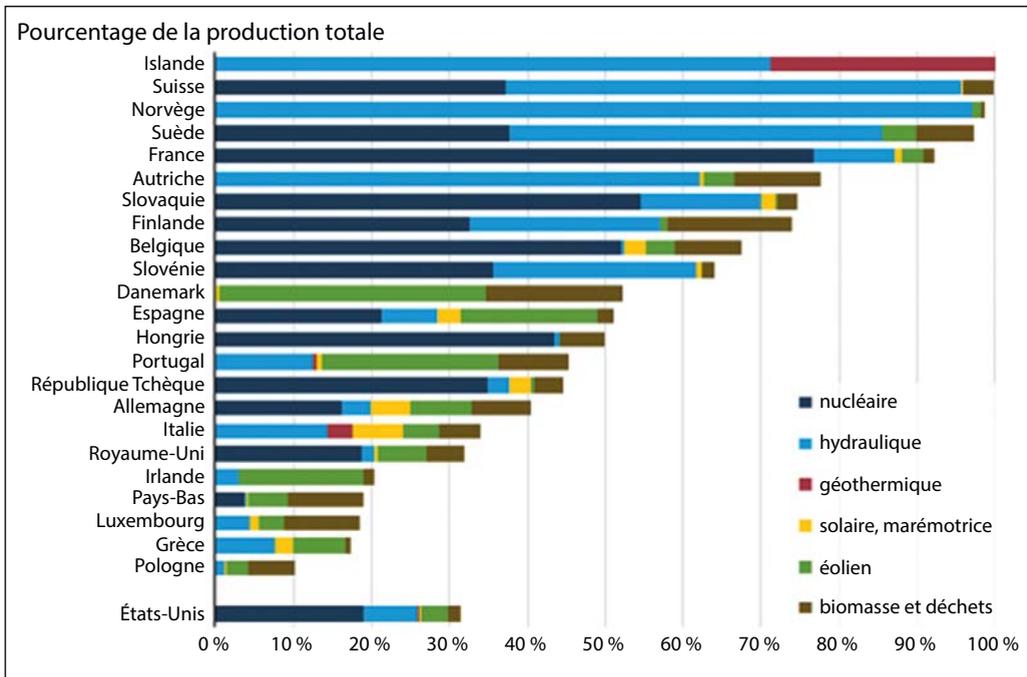


Figure 16

Les différentes sources d'accompagnement pour pallier aux intermittences.

liser l'énergie le matin et le soir (**Figure 17A**). C'est dans cette stratégie que Tesla aux États-Unis et Easyli en France proposent des systèmes de stockage et de gestion intelligente à base de batteries Lithium-ion pour les particuliers (**Figure 17B** et **C**). Ces systèmes encore coûteux vont sans doute être plus abordables dans le futur. L'autre solution pour des puissances plus importantes est celle de la centrale solaire thermique (**Figure 18**) : par concentration, on chauffe une masse importante de fluide à plusieurs centaines

de degrés qui constitue un volant thermique capable de chauffer la vapeur dans un échangeur et d'alimenter ainsi un générateur d'électricité classique qui fournit de l'énergie au réseau, y compris la nuit ou en l'absence momentanée de Soleil.

Enfin pour éviter les coupures catastrophiques du réseau interconnecté, se mettent en place les « smart grid », qui gèrent de façon quasi automatique les variations de consommation et de production sur le réseau. En France, la pose actuelle de compteurs Linsky est un début qui doit



Figure 17

A) Pour pallier les variations du réseau, on peut utiliser le moment optimal pour faire fonctionner les cellules photovoltaïques, grâce à des systèmes de stockage et de gestion intelligente (armoire Tesla (B) et armoire Easyli (C)).

Source : C) easyLi Batteries.

Figure 18

Centrale solaire Thémis.

Source : Wikipédia licence CC-BY-SA-3.0, David66.



permettre au consommateur et à l'opérateur de connaître en temps réel la consommation électrique (**Figure 19**).

3.5. Le transport

N'oublions pas que pour les applications de transport automobile, le pétrole est une source insolente de stockage de l'énergie. 1 kg de carburant = 10 kWh ! On peut penser que le véhicule du futur sera le véhicule électrique, mais avant d'y parvenir il y a encore du chemin à parcourir, et ceci pour au moins deux raisons :

- les batteries électrochimiques n'ont pas encore de capacités massiques suffisantes ;
- suivant le mix électrique, l'économie en termes d'émission de CO₂ n'est pas toujours évidente.

Si en France le kilomètre électrique correspond à environ 11 g de CO₂, en Allemagne ce même kilomètre vaudra en moyenne 130 g de CO₂ comparable à un diesel économique. Par ailleurs, les carburants biosourcés de première génération, bioéthanol et ester méthylique d'huile végétale, à



l'efficacité énergétique parfois discutable, sont commercialisés en Europe et aux États-Unis, et abondamment subventionnés par les États pour encourager leur consommation par l'utilisateur. Les composés biosourcés pour la chimie organique ne représentent que 7 % de la production, avec un objectif de 10 % en 2020. Pour ceux-ci comme pour le bioéthanol de 2^e génération, la recherche de procédés performants susceptibles de faire baisser les prix de revient sont essentiels car s'ils étaient concurrentiels avec un baril à 80 \$, ils ne le sont plus à 40 \$!

Figure 19

La nouvelle ère : les compteurs Linky du réseau intelligent.

Source : Wikipédia licence CC-BY-SA-4.0, Ener356.

De l'avenir pour les énergies renouvelables

Il ne semble pas que les énergies renouvelables puissent subir un coup d'arrêt brutal consécutif à la forte baisse du prix du baril de pétrole, en témoignent les investissements records en 2015, et pour plusieurs raisons :

- la part d'électricité mondiale issue du pétrole est devenue marginale ;

- les prix du kWh solaire et éolien deviennent de plus en plus compétitifs ;
- l'innovation des techniques de fabrication des panneaux photovoltaïques et des pales et génératrices des éoliennes a encore de bonnes marges de progrès ;
- un large public a pris conscience que les ressources fossiles, elles, avaient irrémédiablement des limites physiques, et qu'il fallait trouver une alternative, même s'il faut accepter d'en payer le prix ;
- pour les transports, où les ressources fossiles vont rester encore indispensables pendant des années, il faut compter sur un fort effort de recherche et de développement.

Ce n'est donc pas la chute des prix du baril de pétrole qui va limiter la progression des énergies renouvelables, ce sont les verrous technologiques qui peuvent les freiner.

La complexité du réseau et l'électricité verte

D'après la conférence de Yves Bréchet

Professeur à l'Institut Polytechnique de Grenoble, spécialiste des matériaux, Yves Bréchet est Haut-commissaire à l'Énergie Atomique, membre de l'Académie des Sciences et membre du comité de l'Énergie Atomique. Il a reçu la médaille d'argent du CNRS en 2009, le Prix Aymé Poirson de l'Académie des sciences en 2010 et la légion d'honneur la même année.

1 La décarbonation de l'énergie pour lutter contre le réchauffement climatique

Ces réflexions résultent d'échanges avec le docteur André Aurengo pour des aspects médicaux, avec Olivier Vidal, Directeur de recherche au CNRS à l'Institut National des Sciences de l'Univers (INSU), pour les aspects ressources minérales, et avec Nouredine Hadjsaid, directeur du Groupement d'intérêt Économique « Inventer la Distribution Électrique de l'Avenir » (GIE IDEA), pour les aspects réseaux.

1.1. L'énergie et l'histoire de la civilisation

L'histoire de la civilisation commence il y a très longtemps. L'homme commence par utiliser l'énergie solaire stockée dans le bois qui est

transformée en énergie animale, puis il utilise l'énergie mécanique des moulins à vent et à eau, ensuite l'énergie chimique issue du charbon, du pétrole et du gaz, pour enfin terminer avec l'énergie nucléaire de fission et de fusion (**Figure 1**).

Pourquoi dans cette marche continue vers un style de vie qui consomme de plus en plus d'énergie, avec une production de plus en plus dense, avons-nous envie de revenir à la source initiale, l'énergie solaire, au lieu de partir de l'énergie de fusion et de l'énergie nucléaire ?

1.2. Vers la décarbonation de l'énergie ?

La décarbonation de l'énergie semble être l'un des aspects essentiels de la lutte contre le réchauffement climatique et en tous cas de la transition énergétique. Mais bien



Figure 1

Histoire de la civilisation : une marche continue vers un style de vie consommant de plus en plus d'énergie avec une production de plus en plus dense.

qu'on en parle beaucoup, peu de choses sont réalisées ; on n'observe pas d'évolution pour les pays européens et le Japon, et la Chine se développe en carbonant de plus en plus son économie, en développant de plus en plus la production d'énergie par le charbon (Figure 2). La décarbonation de la planète semble actuellement mal partie !

Quand on examine les émissions en CO₂ des différentes filières énergétiques

(Figure 3), il y a les bons et les mauvais élèves, et parmi les bons élèves, le nucléaire, l'hydraulique, l'éolien et le photovoltaïque représentent un potentiel de décarbonation de notre économie, et en tout cas de notre électricité.

1.3. En France, la transition énergétique a déjà eu lieu...

La transition énergétique a de fait eu lieu en France en 1973 (Figure 4) quand nous avons

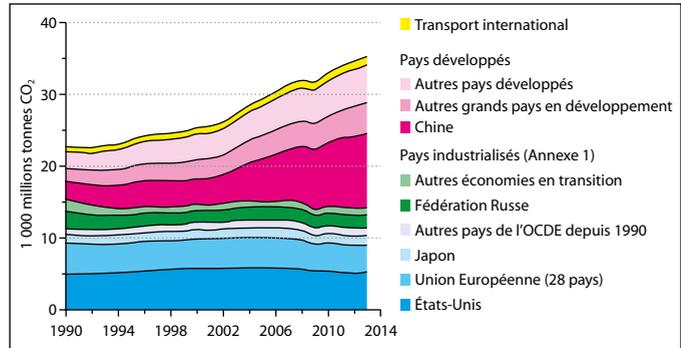


Figure 2

La production de l'énergie et les gaz à effet de serre : émissions de CO₂ selon les différents pays, de 1990 à 2014.

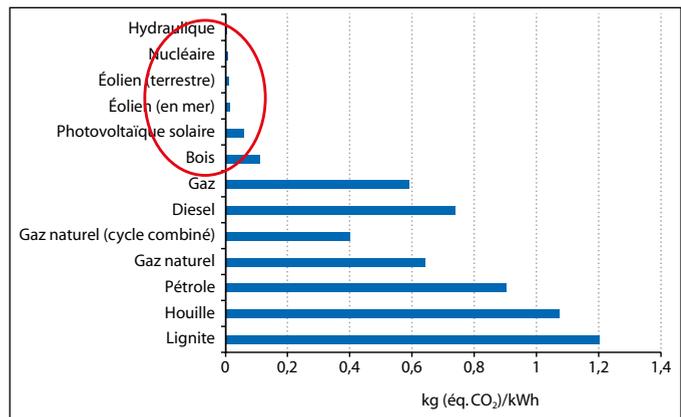


Figure 3

Émissions de gaz à effet de serre selon les filières énergétiques.

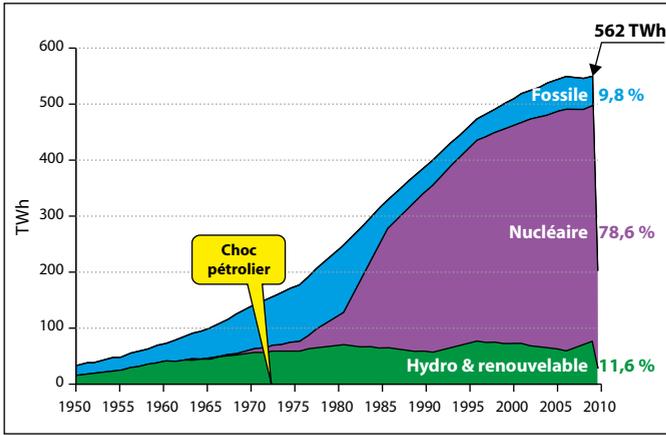


Figure 4

Évolution des filières énergétiques françaises et quelques dates clés : 1970 : appel d'offres pour 6 x 900 MWe (Mégawatt électrique) réacteurs à eau pressurisée (REP) Westinghouse ; 1973 : programme de plus de 28 REP-900 ; 1980 : renonciation à la licence Westinghouse ; années 1980 : déploiement de 20 REP-1300 ; années 1990 : déploiement de 4 REP-N4 ; 1992 : Lancement de l'EPR par NP-Int^{al}.

Source : IEA.

décidé d'utiliser autre chose que du pétrole et du charbon pour produire notre électricité : ce fut le plan Messmer qui développa le panorama dans lequel nous sommes actuellement, et dans lequel 75 % de notre électricité est d'origine nucléaire.

Pour proposer une évolution rationnelle des choses, il faut connaître le point de départ à partir duquel on doit évoluer.

Le **Tableau 1** résume les sources d'énergie qui peuvent être utilisées selon les besoins de consommation, raccordées au réseau ou hors réseau. Il est intéressant de voir que les besoins énergétiques à mobiliser pour une maison sont de l'ordre de 10 kW, ce qui peut être fourni par de gros panneaux solaires, mais ces derniers ne suffiront pas pour faire fonctionner une usine à électrolyse !

Ainsi, quand on parle des besoins énergétiques d'un pays, il faut prendre conscience que ce n'est pas le profil énergétique ni d'une population de retraités, ni d'une population d'individus qui se demandent comment ils vont occuper leurs loisirs ; c'est aussi le profil énergétique d'un pays qui a une industrie, et cette industrie peut être très fortement énergivore. Il faut prévoir une évolution de notre production de l'énergie qui prenne en compte des moyens et des conditions de vie qui sont différents, sans perdre de vue le fait qu'un pays n'est riche que quand il produit quelque chose. Certaines personnes rêvent d'avoir une industrie sans usine, mais c'est impossible ; il faut garder « les pieds sur Terre » et savoir qu'on a besoin d'énergie pour avoir des usines, et

Tableau 1

Sources d'énergie possibles en fonction des besoins énergétiques à mobiliser (du watt au gigawatt) et du profil des consommateurs raccordés ou non au réseau.

	Producteur	Consommateur (raccordé au réseau)	Consommateur (hors réseau)
1 W		Appareil en veille	Téléphone portable
10 W		HiFi, lampe basse consommation	Radio, PC portable
100 W		Ampoule, PC	Tournevis électrique
1 kW	Panneaux solaires	Radiateur, électroménager	
10 kW	Gros panneaux solaires	Maison	Traction V.E.
100 kW	Éolienne, micro-turbine, centrale photovoltaïque	Groupe froid usine Patinoire Grenoble (300 kW)	Tram (350 kW) Avion (150 kW A330 – hors propulsion)
1 MW	Éolienne	Éclairage Stade de France Hopital St Joseph	1 moteur de TGV
10 MW	Centrale solaire	Ville de 10 000 habitants Consommation électrique du CdG (16 MW – hors propulsion)	TGV
100 MW	Centrale thermique ou hydraulique	Ville de Grenoble : consommation 300 MW	
1 GW	1 tranche nucléaire, interconnexion France Angleterre (IFA 2000 – 2 GW)		
100 GW	Consommation de pointe en France (60 millions d'habitants)		

que c'est dans ce cas qu'on a un pays avec une activité créatrice de richesses.

1.4. Les différents plans énergétiques possibles

L'un des livres de David McKay, *Sustainable Energy – without the hot air*, présente les différents plans énergétiques possibles pour produire la même quantité d'énergie nécessaire par personne en tenant compte de la quantité d'énergie maximale que peuvent produire les différentes sources envisagées

(*Figure 5*). Le choix d'un panier énergétique ne dépend pas uniquement de considérations scientifiques, mais aussi de considérations politiques et économiques. Cependant, un point n'est pas négociable : ce que l'on produit doit être égal à ce que l'on consomme au moment où on le produit. Le stockage sur le lieu de consommation ou le transport vers le lieu de consommation permettent de relâcher cette contrainte. Ces conditions sont à prendre en compte pour faire l'analyse de n'importe quel mix énergétique proposé.

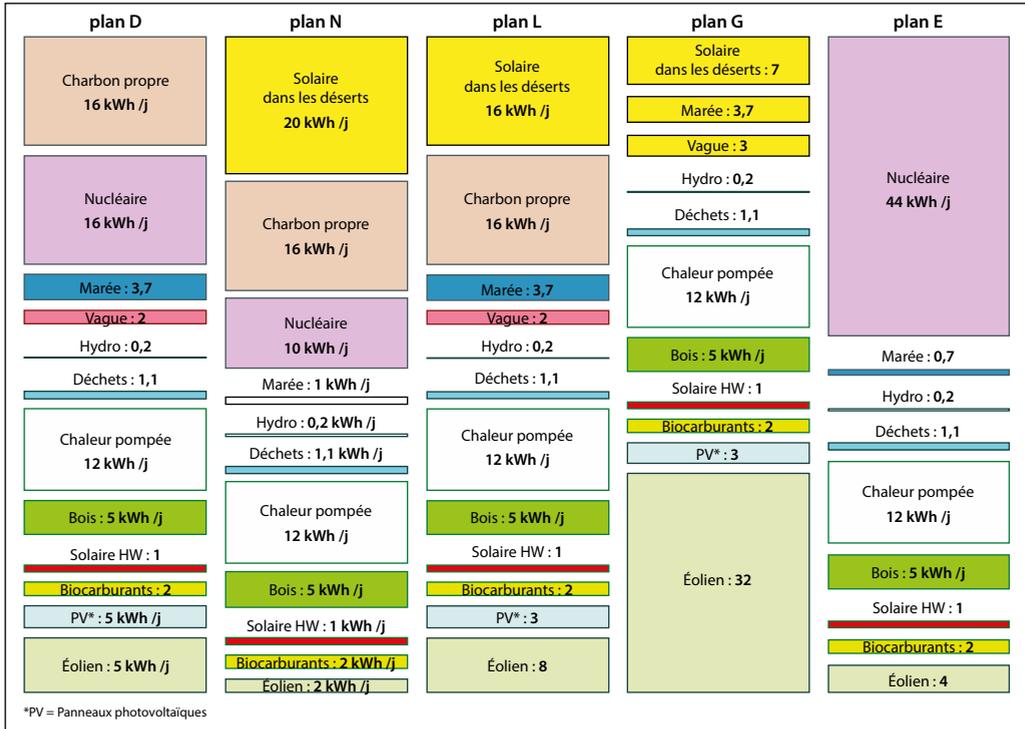


Figure 5

Les différents plans énergétiques possibles (faisabilité) d'après David McKay.

2 Les énergies renouvelables sont au cœur de l'actualité

2.1. La doxa

La doxa (ou préjugés populaires) est actuellement celle-ci :

- les sources d'énergie renouvelables sont inépuisables, sans déchets ; la source elle-même est perçue comme inépuisable et même gratuite (le vent, le Soleil) ;
- leurs coûts diminuent rapidement avec l'extension du domaine d'action et du développement ;
- on peut très rapidement faire des transitions énergétiques vers les renouvelables.

Mais ne rêvons pas et discutons scientifiquement et objectivement ces différents points pour nous aider à réfléchir :

- « *Les sources d'énergie renouvelables sont inépuisables* » : le vent est inépuisable, le Soleil est inépuisable, il est même gratuit, c'est vrai, mais le charbon est gratuit tant qu'on n'a pas essayé de le sortir, et il en est de même pour le pétrole. *La gratuité d'une ressource non exploitée est la règle, pas l'exception* ;
- « *Le coût diminue rapidement avec l'extension du domaine d'action* » : remarquons que ce n'est pas vrai pour le nucléaire

et que le prix à la source n'est pertinent que si le coût de la mise à disposition est négligeable ;

- une troisième remarque, extrêmement importante, est que l'inertie des systèmes industriels est à la propor-

tion des investissements présents, c'est-à-dire qu'on ne peut pas développer immédiatement un réseau de distribution qui puisse résoudre tous les problèmes. Il faut prévoir des investissements qui sont lourds, et donc il faut savoir qui va payer, connaître le modèle et l'échelle de temps. Quand on peut se brancher sur un réseau de distribution déjà existant, c'est un atout très fort pour un vecteur.

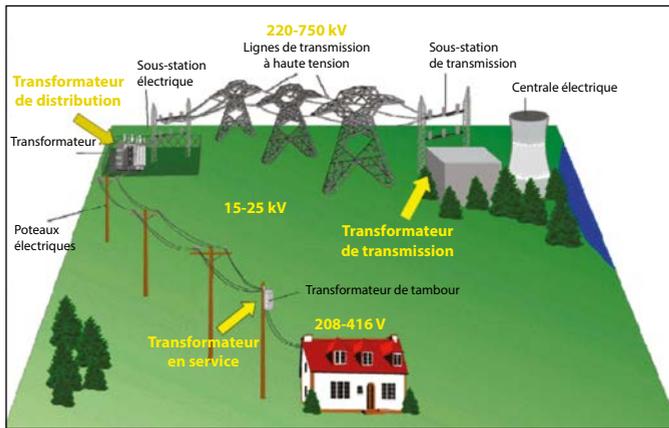


Figure 6

Distribution de l'électricité depuis la source jusqu'à son utilisation.

2.2. Le système de distribution de l'électricité

L'électricité est distribuée, depuis la source, par des lignes à hautes tensions, puis par un réseau de transport, et enfin un réseau de distribution (Figure 6).

2.2.1. Le Réseau de Transport de l'Électricité (RTE)

Le réseau de transport va des centrales aux abords des centres de consommation (en à peu près 50 000 km), l'interconnexion et la répartition connectent les différents centres et les zones d'utilisation, et une distribution permet ensuite d'assurer le transfert vers le client.

La Figure 7 représente deux cartes du réseau RTE français, selon la tension de l'électricité transportée.

2.2.2. Comment passer de la ressource existante à la ressource utilisable

Pour analyser le passage de la ressource naturelle à la ressource utilisable, il faut introduire la notion d'index d'intensité matériau d'une source d'énergie. Que l'énergie soit d'origine renouvelable ou fos-

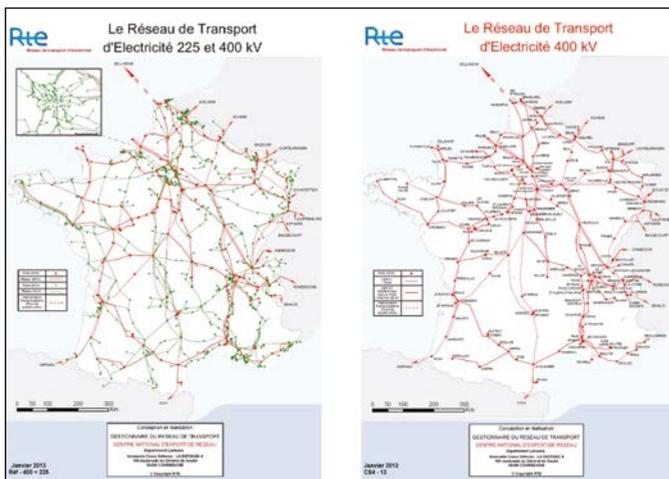


Figure 7

Le réseau de transport français d'électricité 225 kV et 400 kV (janvier 2013).

Source : RTE.

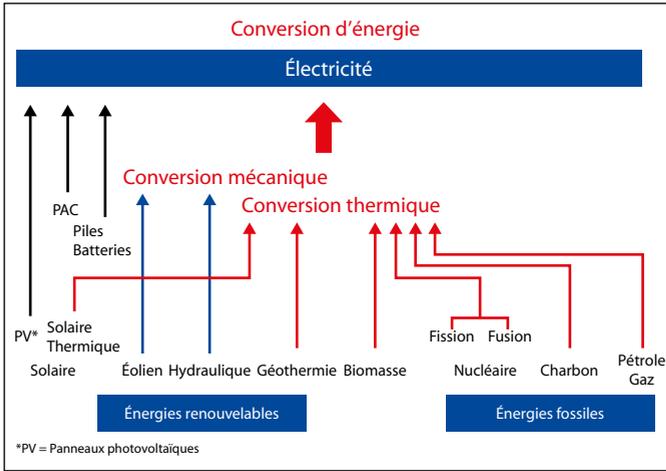


Figure 8

La production d'électricité : en partant des énergies renouvelables ou fossiles par les conversions mécaniques ou thermiques.

sile, elle est transformée par une conversion thermique ou par une conversion mécanique en électricité (Figure 8). Il faut donc connaître l'objet qui réalise cette transformation

La Figure 9 présente l'exemple d'une turbine à vent génération 6, de 6 MW, avec un rotor de plus de 150 mètres. Cet ensemble représente 1 500 tonnes d'acier et une quantité non négligeable d'aimants permanents contenant des terres rares. Depuis longtemps, on soulève le problème des terres rares contenues dans les aimants des éoliennes alors que c'est le moins grave comparé aux quantités d'aluminium, de cuivre et de béton utilisées.

La Figure 10 donne les index d'intensité pour l'acier (en tonne utilisée par quantité d'énergie produite), pour différentes sources d'énergie. Dans le cas du nucléaire, la quantité d'énergie produite



Figure 9

Turbine à vent génération 6 MW avec un rotor supérieur à 150 mètres (1 500 t d'acier), aimants permanents avec des terres rares (Nd, Dy, Sm, Gd ou Pr).

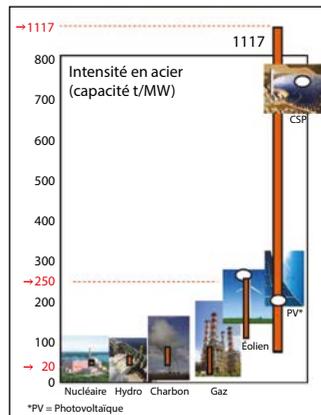


Figure 10

Index d'intensité des matériaux pour différentes sources d'énergie (nucléaire, hydraulique, gaz, éolien, photovoltaïque...).

par tonne d'acier utilisée est énorme, c'est pour cela que l'intensité nucléaire de l'acier est très faible même si les centrales nucléaires en utilisent beaucoup. Pour le solaire, au contraire, l'intensité matériau est absolument énorme parce que l'énergie produite est relativement faible pour des quantités de matière gigantesques.

Le scientifique a pour fonction de faire réfléchir avant de faire rêver. Les économistes adorent les exponentielles, alors ils extrapolent toutes les prévisions à 2050 grâce à des fonctions intéressantes qui sont les exponentielles « bondissantes », mais sans prendre en compte à combien de tonnes de matériaux consommés correspondent ces exponentielles en termes

d'acier, d'aluminium, de cuivre et de verre. La réalité apparaît sur la **Figure 11**, qui montre qu'en 2050, selon leurs prévisions, la quantité cumulée de ces matériaux qui seront séquestrés dans du photovoltaïque ou dans de l'éolien, si on croit ce qui est affiché par tous les gouvernements, y compris le nôtre, correspond à 2 à 8 fois la production totale mondiale de 2010. Ce qui veut dire pour que cela soit réalisable, pendant 2 à 8 ans il ne faudrait pas construire un seul pont, une seule voiture, un seul train ou un seul bâtiment ? Cela est peu vraisemblable !

Il reste trois possibilités : soit il faudra pratiquer un recyclage massif de matériaux (ce qui n'est pas impossible), qui n'ont pas forcément une très

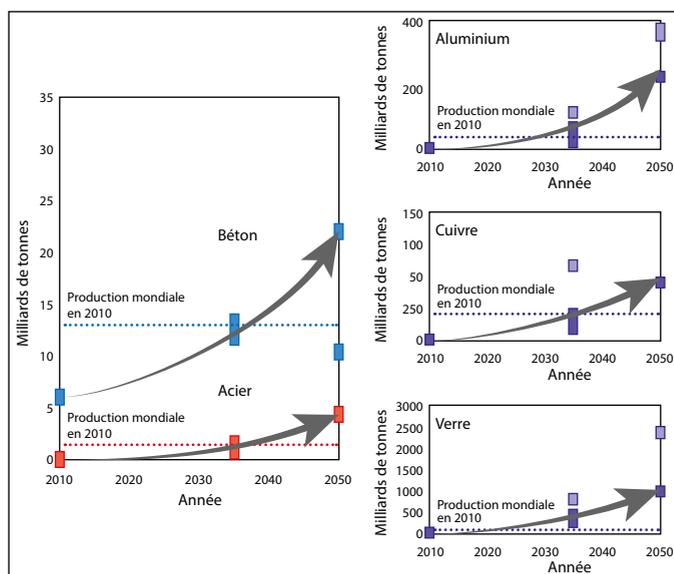


Figure 11

Besoins en matériau (aluminium, acier, cuivre, verre) pour les prévisions actuelles de développement du photovoltaïque et de l'éolien jusqu'en 2050. En 2050, la quantité cumulée des besoins serait de 2 à 8 fois la production mondiale en 2010 !

haute valeur ajoutée, soit il y aura une récession massive dans certains domaines. La troisième possibilité est que cette extrapolation n'est pas sérieuse !

Il est important de développer sérieusement les énergies renouvelables mais il ne faut pas les survendre. Ce que l'on voit et entend actuellement ressemble à la bulle qu'il y a eu autour de la télécommunication qui a éclaté le jour où quelqu'un s'est aperçu que si on prenait les business plans de toutes les entreprises de télécommunication, on s'apercevait que pour pouvoir les remplir il fallait que chaque personne suive 24/24h quatre chaînes de télévision en même temps sur trois iPhones !

2.2.3. Passage de la ressource utilisable à la ressource disponible

Le point suivant est le passage de la ressource utilisable à la ressource disponible qui pose le problème de l'inter-distance spatio-temporelle et le choix de la production centralisée versus la production décentralisée (Figure 12).

À nouveau, il faut savoir d'où on part car on peut parfaitement développer de nouveaux modes de production et de nouveaux modes de distribution de l'électricité, mais cela ne se fera pas de manière spontanée.

L'un des problèmes de l'éolien est sa fluctuation, qui peut être assez brutale, comme le montre l'exemple danois de la Figure 13. Il y a toujours la solution de combler le manque en demandant au voisin, mais ce n'est pas toujours possible,

notamment pour l'éolien, car le vent n'est rien d'autre qu'un flux entre une zone de surpression et une zone de dépression, et les grandes zones de surpression et de dépression sont distantes de 200 ou 300 km. Le maillage est donc à faire avec une zone qui va se trouver à 200 ou 300 km. Mais

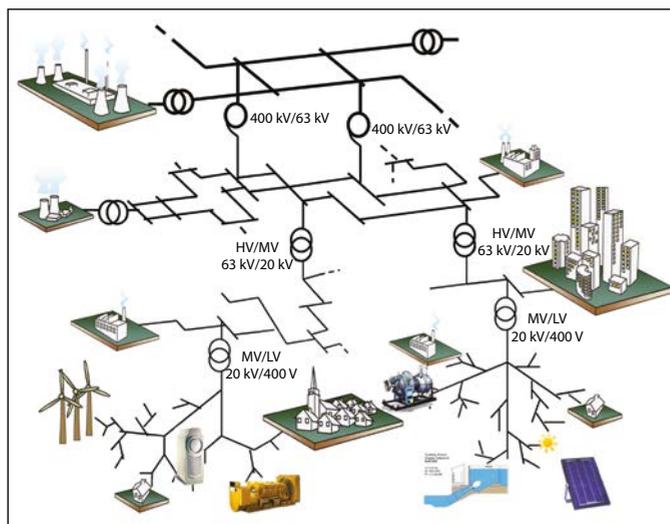


Figure 12

Production centralisée vs production décentralisée : développement de nouveaux modes de production et de nouveaux modes de distribution de l'électricité.

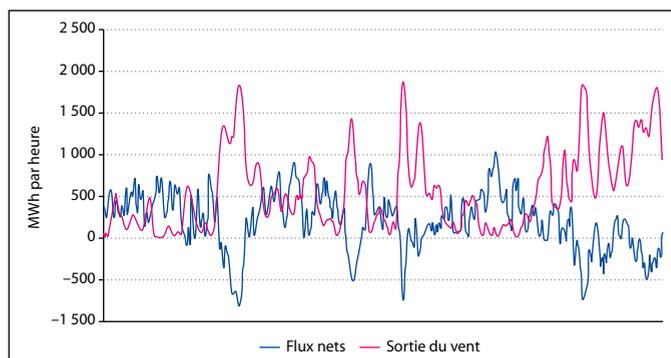


Figure 13

Flux nets (réels) d'une production éolienne d'électricité au Danemark en juillet 2007.

au moment où une quantité énorme d'électricité est produite par l'éolien, il se peut fort bien que le voisin à 200 ou 300 km ait lui aussi une quantité énorme fournie par l'éolien ou bien qu'il n'ait simplement pas le réseau adapté. Ce type de difficulté a donné lieu à des tensions extrêmement brutales entre l'Allemagne et la Pologne en 2014. L'intermittence n'est en outre qu'une partie du problème car si l'éolien est intermittent, il ne l'est pas de la même manière en Europe du Nord et sous les tropiques, ou bien à Singapour, ce qui nécessite à chaque fois d'analyser la configuration à mettre en place en termes de géographie et en termes de sciences de la Terre.

On peut rêver que d'autres sources permettront de compenser ces fluctuations et d'adapter la production

aux besoins (*Figure 14*), par exemple en faisant fonctionner les centrales nucléaires sans arrêt, ce qui est en fait impossible car il faut tenir compte de la fatigue du matériel comme du personnel.

3 Les caractéristiques des énergies renouvelables (EnR) intermittentes

Trois principales caractéristiques sont à prendre en compte pour développer les EnR :

- ce sont des « énergies fatales », c'est-à-dire qu'elles ne sont pas forcément disponibles lorsqu'on en a besoin, qu'elles dépendent des conditions météorologiques et qu'il faut prévoir d'autres moyens de production disponibles, pour produire quand cette puissance fatale n'est pas disponible ;

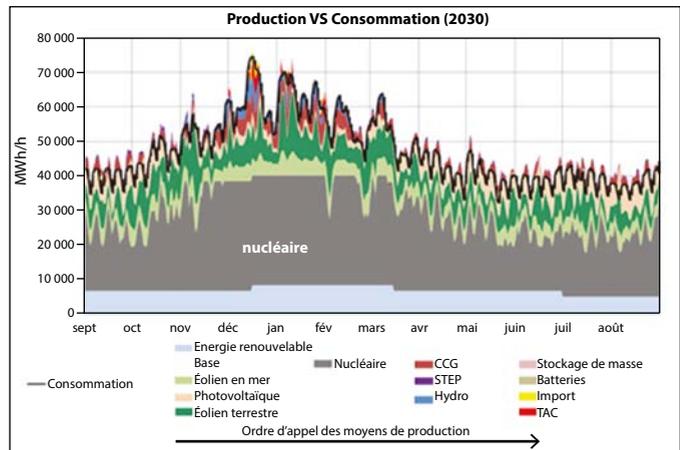


Figure 14

Adaptation de la production annuelle aux besoins : une vision à l'horizon 2030 de la compensation des fluctuations des énergies intermittentes par d'autres sources notamment le nucléaire.

CCG : capture et stockage du CO_2 ; STEP : station de transfert d'énergie par pompage.

– ce sont des énergies intermittentes, il faut donc pouvoir compenser les fluctuations. La variabilité est extrême : elle peut être d'une heure, d'une minute et même d'une seconde à l'autre ;

– ce sont des énergies qui sont diffuses, c'est-à-dire avec un faible rendement des surfaces occupées.

Ces caractéristiques font que les EnR ne fonctionnent pas seules et ne se substituent pas à des moyens dispatchables : il ne suffit pas de le souhaiter pour que cela soit réel.

3.1. Les EnR sont diffuses

Le **Tableau 2** montre, à partir de quelques exemples de densités énergétiques (en W/m^2) pour différentes sources, combien les EnR sont diffuses. Même dans le cas du solaire photovoltaïque à concentration, dans le désert, la densité énergétique n'est que de 2,5 à 15-20 watt par m^2 , soit environ cinquante fois plus faible que celle du nucléaire. Il est important de savoir qu'aussi longtemps qu'on aura besoin d'une énergie concentrée pour des industries électro-intensives ou pour des habitats urbains denses, la solution tout EnR ne sera pas une solution viable.

3.2. Intermittence et stockage

Comme les EnR ne se produisent pas forcément à l'endroit où l'on en a besoin et qu'elles ne suffisent pas toujours à l'endroit et au moment où l'on en a besoin, pour les inscrire dans le panel énergétique, il faut apprendre à gérer

l'intermittence, c'est-à-dire apprendre gérer le transport et le stockage.

Une solution peu réaliste consisterait à gérer les fluctuations de la consommation de manière autoritaire en planifiant la consommation et en prévoyant un pic de consommation le matin et le soir : « le pic des grille-pains et le pic des spaghettis ». Mais ce n'est pas très facile à mettre en application : on pourrait le faire en donnant des tarifs qui feraient qu'effectivement les nouilles coûteraient moins cher si on les mange à neuf heures du soir !

Les paramètres clés pour choisir les technologies de stockage sont de deux ordres :

- techniques : énergie, puissance et temps de réponse ;
- économiques : car le coût est encore élevé.

Un certain nombre de solutions de stockage énergétique ont été envisagées (**Figure 15**).

Pour les stockages de masse localisés, les plus simples et les plus efficaces sont les STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage), décrits dans

Tableau 2

Densités énergétiques des énergies renouvelables.

Source	Densité énergétique W/m^2
Éolien	2,5
Plantes	0,5
Solaire photovoltaïque	5-20
Hydraulique piscine	3
Hydraulique au fil de l'eau	8
Solaire à concentration dans le désert	15-20

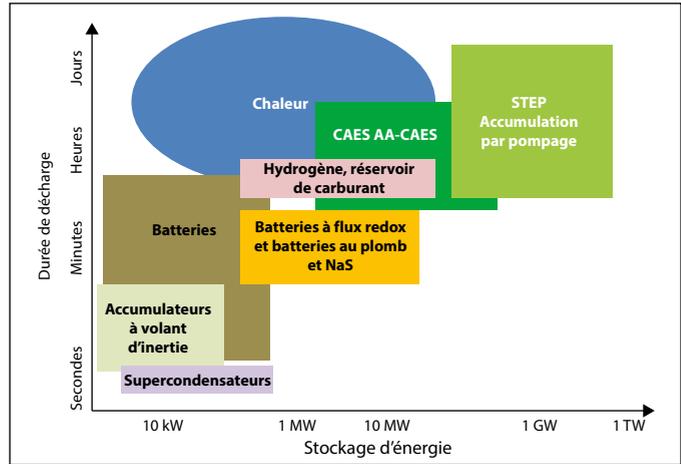


Figure 15

Comparaison des technologies de stockage : durée de stockage et puissance stockée.

le **Chapitre de S. Candel** dans cet ouvrage *Chimie et changement climatique* (EDP Sciences, 2016). Les STEP marins sont en pleine évolution. On peut néanmoins imaginer que l'acceptabilité de creuser des trous pour y stocker du gaz sous pression ne soit pas encore tout à fait triviale. La **Figure 16A** présente le schéma d'une STEP et la **Figure 16B** le schéma de fonctionnement de la turbine durant les phases de stockage et de restitution de l'énergie.

Il existe aussi des technologies de stockage non centralisé pour les cas où il n'est pas nécessaire de prévoir le stockage d'une grosse quantité d'électricité. C'est le cas du stockage électrochimique avec les batteries (**Figure 17**) ou du stockage à l'hydrogène. Se pose néanmoins la question du coût et des déperditions quand il faudra les transporter ou les rassembler à l'endroit où l'on aura besoin de l'énergie stockée.

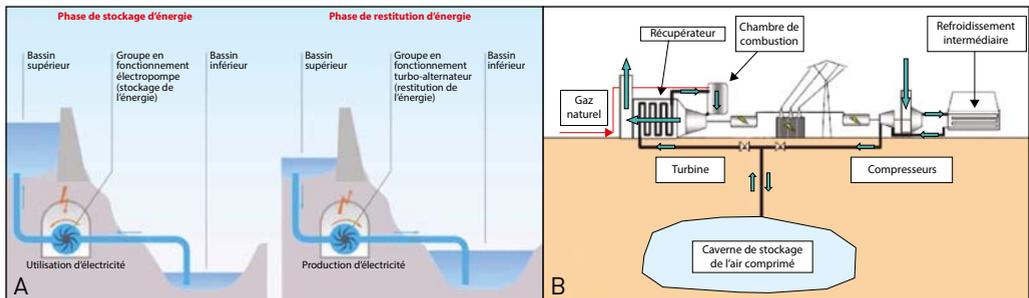


Figure 16

Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP), des solutions de stockage de masse localisées : A) schéma d'une centrale STEP ; B) schéma de fonctionnement d'une turbine.

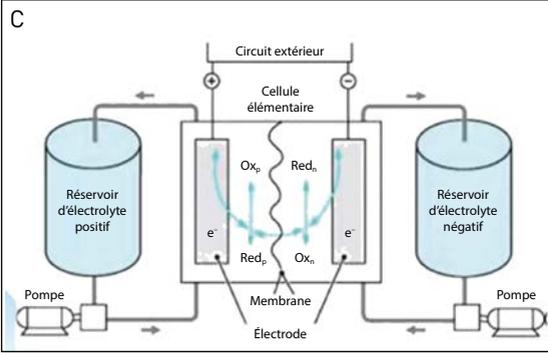
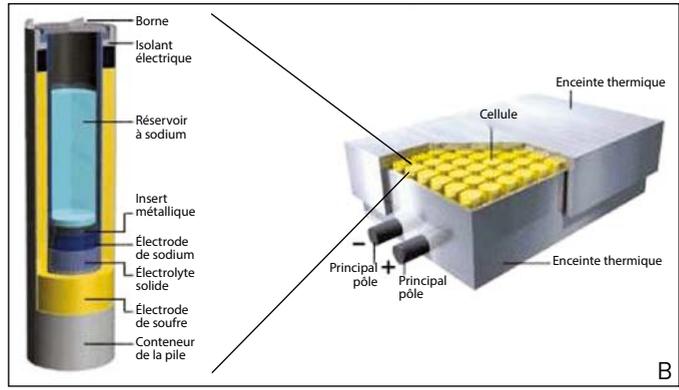


Figure 17
Exemples de stockage électrochimique pour le réseau. A) Stockage lithium-ion à l'échelle du réseau ; B) accumulateur au NaS (durée de vie jusqu'à quinze ans, > 4 000 cycles en conditions non critique (décharges inférieures à 80 %), rendement 85 %, puissances type : 1-4 MW ; C) accumulateur à circulation (flux redox) : utilisation possible pour stockage nuit/jour, puissance allant de quelques MW à une centaine de MW, rendement 65-75 %.
 Sources : A) www.grist.org ; B) NGK Insulator ; C) Techniques de l'ingénieur.

4 De la ressource utilisable à la ressource défaillante : les risques du blackout

Il est important d'attirer l'attention sur ce problème parce que cela pourrait bien devenir un problème de santé publique.

4.1. Défaillance généralisée du réseau électrique

La défaillance généralisée du réseau électrique est d'une extrême complexité parce que les réseaux sont à dimension européenne et qu'il faut un équilibre production/consommation. Un surplus d'électricité ou un manque d'électricité peuvent déstabiliser un réseau qui est soumis à de fortes contraintes : en rapport tension/intensité, en fréquence et en phase. Ces contraintes sont aggravées

avec l'arrivée des nouvelles sources, intermittentes, peu prévisibles.

4.2. Des conséquences potentielles dramatiques

Les conséquences potentielles de blackout peuvent être dramatiques. Elles ont un certain nombre de caractéristiques qui sont l'étendue géographique, la profondeur, la durée. L'électricité est partout et est utilisée à peu près par toutes les activités. Il y a un nombre impressionnant de systèmes dans lesquels elle intervient : la flexibilité, la distribution, les non stockables. Sans vouloir faire peur, un blackout sur l'électricité a des conséquences à craindre dans les domaines économique, industriel, sanitaires, de défense nationale, dans la cyber sécurité.

4.3. La désorganisation économique

Elle concerne l'absence d'éclairage, la signalisation, le transport... Durant la dernière grosse panne de New York en 2003, une quantité incroyable de personnes s'étaient trouvée coincée dans les ascenseurs. Cela entraîne l'arrêt de la distribution d'eau, l'arrêt des installations sanitaires, la rupture de la chaîne du froid (aliments, médicaments), la rupture du commerce (banques, magasins), la perte des outils de travail (PC, téléphones mobiles...), le stress psychologique, la défaillance des systèmes de communication, un ensemble de situations très désagréables.

4.4. Historique des blackouts

Le **Tableau 3** reporte quelques blackouts qui ont eu lieu en Italie, aux États-Unis et en Indonésie (qui concernait 100 millions d'habitants). Le plus important était en Inde : 670 millions d'habitants.

Quelques-uns ont eu lieu en France :

- décembre 1978, l'excès de la demande à une heure de pointe a entraîné la défaillance de la ligne THT (très haute tension) Nancy-Troyes avec

pour conséquence la chute en cascade de l'ensemble du réseau alimentant Paris ;

- décembre 1999, deux tempêtes sans précédent ont privé 3,6 millions de foyers d'électricité. Les équipes d'EDF ont mis plusieurs jours à rétablir le courant pour l'ensemble des foyers ;

- mars 2005, un hiver rigoureux et la vétusté des centrales thermiques ont privé 200 000 personnes d'électricité en Corse.

4.5. Les conséquences sanitaires

Le blackout corse n'a pas conduit à des dangers majeurs, parce qu'ils étaient relativement limités. La Corse n'est pas très grande, et EDF a l'obligation en cas de panne d'électricité d'amener les personnes qui ont un besoin impératif d'électricité dans des hôpitaux pour être soignés. Les hôpitaux eux-mêmes sont parfaitement équipés en groupes électrogènes. Le problème sanitaire n'est donc pas dans les hôpitaux mais pour les personnes qui sont chez elles avec des aides respiratoires, avec des dialyses, et, compte tenu de la pyramide des âges dans

Tableau 3

Historique des blackouts importants.

	Profondeur	Date
Italie	50 millions d'habitants	29 septembre 2003
États-Unis (New York)	55 millions d'habitants	14 août 2003
Indonésie	100 millions d'habitants	18 août 2005
Bésil et Paraguay	87 millions d'habitants	10 novembre 2009
Inde	670 millions d'habitants	31 juillet 2012

la population, ces risques ne vont pas décroître.

En conséquence, EDF peut raisonnablement gérer le problème s'il se limite à une ville, un canton, à la limite à un département, mais si cela se passe sur toute une région, EDF ne sera pas capable de le gérer.

Dans un tel cas, il faut être capable, au moins en ce qui concerne les personnes électro-dépendantes pour des raisons médicales, de pouvoir très rapidement avoir une manière pour leur faire tenir deux, trois, quatre, cinq jours,

le temps qu'on remette le réseau en marche. Car quand on analyse les grandes pannes de réseau, il n'est pas du tout exclu de mettre plusieurs jours, voire une semaine pour remettre un réseau en marche. Laisser un patient une semaine sans faire de dialyse est dangereux !

Donc un vrai défi industriel est de pouvoir disposer d'aides qui ne soient pas chères et qu'on puisse placer au bon endroit. C'est un problème de santé publique qui devrait être traité avant qu'on ne soit obligé d'y faire face dans l'urgence.

Le futur du mix énergétique français

Pour faire les bons choix pour l'avenir, il faut rappeler règles élémentaires :

- la première est que *décarboner l'énergie* est sûrement essentiel dans la transition énergétique et qu'il serait légitime d'y voir l'objectif majeur ;
- le transport, le logement et l'industrie sont trois aspects qu'il va falloir prendre en compte, et il n'est pas raisonnable d'imaginer le problème résolu simplement en parlant aux gens de ce qui les touche le plus directement dans leurs loisirs ;
- le vecteur électrique joue un rôle essentiel et il peut y avoir un rôle essentiel du vecteur hydrogène (voir le *Chapitre de P. Mauberger dans Chimie et changement climatique*) ;
- il y a clairement besoin d'un effort sur l'efficacité énergétique, aussi bien dans les transports que dans l'habitat : l'allégement des structures, l'isolation des bâtiments, les procédés économes en énergie ;

– l'électricité est difficile à stocker : elle doit être consommée où on la produit et quand on la produit, d'où l'importance des réseaux de transport et des stockages.

Enfin, n'oublions pas le « bon sens » dans toutes les démarches. On n'a jamais vu se résoudre un problème d'ingénieur en oubliant les conditions initiales, en ne respectant pas les conditions aux limites et en ne spécifiant pas les objectifs recherchés... :

– la situation actuelle en termes de mix est le point de départ et on ne peut évoluer qu'à partir de ce point de départ ;

– quels sont les critères d'optimisation ? Doit-on viser une optimisation qui minimise les émissions de CO₂ ou doit-on viser une optimisation qui minimise le coût énergétique ou qui minimise l'indépendance énergétique ? Ce n'est pas aux scientifiques de décider du poids respectif de ces différents critères ; en revanche, ils doivent rappeler aux gouvernements que tant qu'on n'a pas explicité ces différents critères et leurs facteurs d'échange, on ne saura pas dans quelle direction aller et progresser ;

– on ne peut rien faire sans tenir compte des lois de la physique qui sont non négociables.

Un mix énergétique n'a de sens qu'accompagné d'une trajectoire crédible de réalisation : quels sont les investissements nécessaires et qui paie ? Quels sont les changements d'habitude nécessaires et qui les impose ?

Beaucoup de choses relativement déraisonnables ont été dites ces derniers temps, notamment cette idée d'avoir une solution 100 % renouvelable en France. Citons, pour y répondre, le philosophe Alain : *« il y a des 'gloutons d'idées' dont la caractéristique est qu'aussitôt qu'on leur fait briller quelque opinion d'apparence raisonnable, ils se précipitent la bouche ouverte et avalent l'appât, l'hameçon et*

la ligne, en invoquant ensuite le droit à l'erreur commise de bonne foi... ».

Les énergies renouvelables jouent et joueront dans l'avenir un rôle important dans la transition énergétique. L'ampleur de ce rôle dépendra de son réalisme économique, et son développement se fera à mesure du développement du réseau et des dispositifs de stockage. Il ne faut pas sauter d'un avion en se disant « *j'aurai bien tricoté le parachute avant de m'écraser au sol* », il faut faire le travail en ingénieur, y aller progressivement et construire des trajectoires crédibles qui permettent effectivement de sortir d'une situation qui était probablement beaucoup trop dépendante d'une source et qui mérite de se diversifier rationnellement.

Partie 4

La chimie
pour se passer
des combustibles fossiles

La chimie face aux défis de la transformation du système énergétique

Sébastien Candèl est professeur des universités Émérite à CentraleSupélec, membre honoraire de l'Institut Universitaire de France et vice-président de l'Académie des sciences. Il est également membre de l'Académie des technologies, de l'Académie de l'air et de l'espace, et membre étranger de la National Academy of Engineering des États-Unis.

1 L'énergie : notions fondamentales et enjeux

1.1. L'énergie, une notion scientifique fondamentale

Énergie, un terme du langage courant, une notion scientifique fondamentale qui joue un rôle technique majeur. L'énergie, c'est **la capacité à effectuer un travail**, par exemple soulever une masse – mais l'énergie intervient dans beaucoup d'autres situations –, et elle est essentielle pour toutes les activités. Lorsqu'on se nourrit, on absorbe environ 2 500 kilocalories ou 3 kWh (kilowatts.heure) par jour. L'énergie (électrique uniquement) que nous consommons chaque année en France, soit

540 milliards de kWh, correspond à 22 kWh de consommation par habitant et par jour¹.

C'est l'énergie qui permet d'extraire les métaux des minerais, de fabriquer du ciment à partir du calcaire, du verre à partir de la silice, etc. Sans énergie, pas de machines, de robots, de voitures, de trains, d'avions, de fusées, pas d'eau potable au robinet, pas de chauffage, de médicaments, peu de nourriture pour la planète, pas de téléphones portables, d'ordinateurs, d'Internet, etc.

1. 540 milliards kWh/66 millions d'habitants en France = 8 180 kWh d'énergie électrique consommée par chaque Français par an. 8180 kWh/365 jours = 22 kWh d'énergie électrique consommée par jour par chaque Français, en moyenne.

1.2. L'énergie existe sous différentes formes

L'énergie se présente sous des formes diverses : mécanique, électrique, chimique, calorifique, électromagnétique (par exemple sous la forme du rayonnement solaire), nucléaire. On sait passer d'une énergie à une autre. Ainsi par exemple, l'énergie solaire est transformée en électricité au moyen de cellules photovoltaïques. L'énergie potentielle d'une masse d'eau stockée derrière un barrage (Figure 1) peut être convertie en énergie cinétique au moyen d'une chute, puis transformée en énergie élec-

trique au moyen d'une turbine hydraulique et d'un alternateur (voir l'**Encart** : « **Combien d'énergie une chute d'eau de cent mètres fournit-elle ?** »).

L'énergie cinétique du vent permet de faire tourner les éoliennes (Figure 2), entraînant des alternateurs, qui transforment l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. La puissance disponible varie comme la vitesse du vent au cube. S'il n'y a pas beaucoup de vent, il n'y a pas beaucoup de puissance ; au contraire, s'il y a trop de vent, l'éolienne ne résistera pas à la vitesse de rotation et il faut l'arrêter.

Figure 1

Une masse d'eau stockée derrière un barrage possède une énergie potentielle. La chute de cette eau au travers d'une turbine, qui entraîne un alternateur, produit de l'énergie électrique.

Source : Wikipédia, licence CC-BY-SA-2.5, David Monniaux.



Figure 2

L'énergie cinétique du vent peut entraîner le rotor d'une éolienne, et, par un générateur, produire de l'énergie électrique. Il faut pour cela que le vent souffle suffisamment fort – mais pas trop fort quand même.



COMBIEN D'ÉNERGIE UNE CHUTE D'EAU DE MILLE MÈTRES FOURNIT-ELLE ?

L'énergie n'est pas quelque chose de facile à obtenir. On suppose un débit de 10 tonnes par seconde (soit 10 m^3 ou 10 000 litres par seconde) qui s'écoulent dans les conduites forcées, et on obtient une puissance de 100 MW, soit une énergie de presque 1 milliard de kWh – environ 0,2 % de l'énergie consommée en France en un an sous forme d'énergie électrique.

Quelques ordres de grandeur pour le calcul de la puissance

$$\mathcal{P} \approx \text{débit masse} \times \text{accélération de la pesanteur} \times \text{dénivellation}$$

Débit volume : $10 \text{ m}^3/\text{s}$

Débit masse : 10 t/s

Accélération de la pesanteur $g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Dénivellation $h = 1\,000 \text{ m}$

$\mathcal{P} \approx 100 \text{ MW}$

Conclusion : il faut des débits d'eau considérables et de fortes dénivellations pour obtenir une puissance de 100 MW (le dixième de la puissance d'une tranche de centrale nucléaire).

1.3. Le facteur de charge et le rendement dans les transformations d'énergie

Il est important d'introduire la notion de « facteur de charge ». Ce facteur est défini comme le rapport de l'énergie effectivement obtenue sur une période de temps à l'énergie qu'on obtiendrait à pleine puissance 100 % sur cette même période. Pour les énergies renouvelables intermittentes, ce facteur de charge dépend essentiellement de la météorologie, du régime des vents pour l'énergie éolienne et de l'ensoleillement pour le photovoltaïque. Ainsi, pour l'énergie éolienne, le facteur de charge est de 18 % en Allemagne, 24 % en France (**Tableau 1**), calculé en moyenne sur l'ensemble de toutes les éoliennes actuellement en fonctionnement. Pour le solaire, le facteur de charge n'est que d'environ 10 % du fait de l'alternance jour/nuit et des heures où le Soleil est caché par les nuages et où l'éclaircissement est réduit.

Tableau 1

Comparaison des facteurs de charge pour l'éolien terrestre et le solaire photovoltaïque en Allemagne et en France.

	Allemagne	France
Éolien terrestre	18 %	24 %
Solaire photovoltaïque	10 %	13 %

Toutes les transformations de l'énergie sont aussi caractérisées par un rendement. On sait par exemple qu'il existe un rendement maximum, le rendement de Carnot, lorsqu'on transforme de la chaleur en énergie mécanique. Le rendement correspondant est quantifié par le « principe de Carnot », énoncé par Sadi Carnot en 1824 (**Figure 3**).

Aujourd'hui dans le monde, 80 % de l'énergie est fournie par la combustion de combustibles fossiles (pétrole, gaz et charbon). La chaleur dégagée par la combustion est transformée en énergie mécanique dans des moteurs thermiques ou dans des tur-

Figure 3

A) Sadi Carnot, physicien et ingénieur français, est reconnu pour ses travaux qui ont posé les bases de la thermodynamique ; B) le mémoire de Carnot sur la puissance motrice du feu, publié en 1824, introduit la notion de rendement dans les transformations d'énergie. Dans toutes ces transformations, l'énergie suit le principe de la conservation de l'énergie. Mais la partie utile n'est qu'un pourcentage de ce qui était disponible : il y a toujours un rendement dans toutes les transformations.

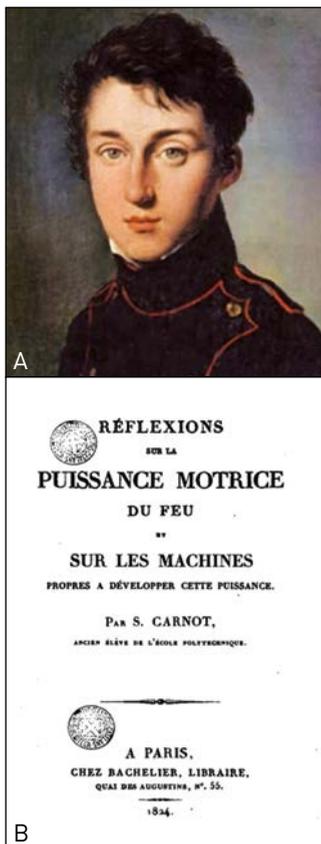


Figure 4

La combustion des matières fossiles (pétrole, gaz, charbon) produit de l'énergie thermique, que l'on sait transformer en énergie mécanique. 80 % de l'énergie est actuellement obtenue des combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz). Cette énergie permet de faire voler les avions, lancer des fusées, rouler les voitures...

Source : Wikipédia, licence CC-BY-2.0, DLR German Aerospace Center.



On peut ainsi faire voler des avions et lancer des fusées (Figure 4).

2 Le défi de la transition énergétique

Un des grands défis posés aux sociétés actuelles est de trouver les moyens de limiter le recours aux énergies fossiles. Les solutions disponibles actuellement pour se passer des énergies fossiles sont loin de pouvoir répondre à ce besoin. Trouver des solutions alternatives va demander des efforts scientifiques, technologiques, industriels considérables, un défi que le chimiste Nathan Lewis, du California Institute of Technology, met en relief en notant que : « L'énergie est le défi technologique le plus important que l'humanité ait à affronter aujourd'hui. Rien en science ou en technologie ne s'en approche... » (Nathan Lewis, "Powering the planet", *Engineering and Science*, Caltech, n°2, 2007).

2.1. La consommation mondiale d'énergie

Un des problèmes essentiels dans l'analyse de la question énergétique est celui de la démographie. La population mondiale a augmenté rapidement depuis deux siècles et cette croissance n'est pas terminée (Figure 5). La plupart des prévisions indiquent que la population de la planète, actuellement de 7 milliards d'individus, va passer en 2050 à environ 10 milliards d'habitants. La demande d'énergie va donc augmenter en proportion.

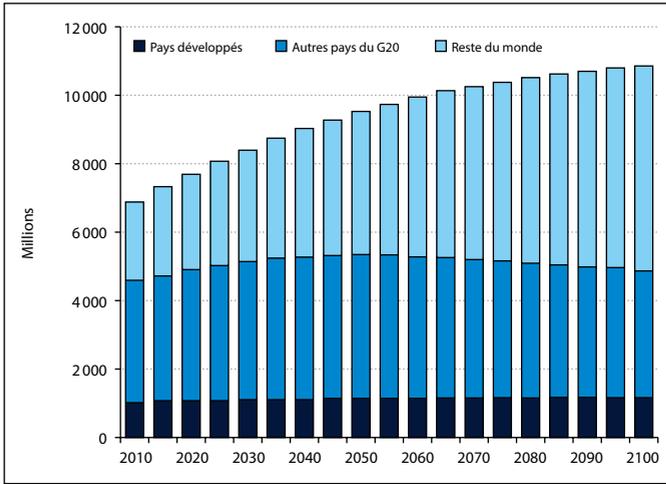


Figure 5

L'augmentation de la demande énergétique est liée à la croissance démographique (ici d'après le modèle intégré global du MIT), qui pourrait atteindre dix milliards en 2050. Elle est également liée à la hausse de la demande énergétique associée au développement économique et à l'augmentation des besoins des pays émergents ou en voie de développement.

Source : J.M. Reilly, 2015, The Bridge, NAE.

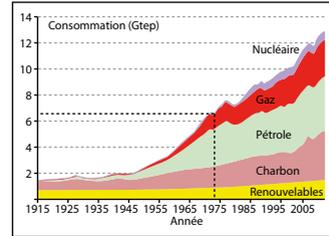


Figure 6

Évolution jusqu'en 2013 des parts de diverses sources d'énergie au niveau mondial.

Source : d'après J.P. Favennec et Y. Mathieu, Atlas mondial des énergies, Armand Colin, 2014.

La consommation mondiale d'énergie a doublé en quarante ans, elle croît à un rythme d'environ 2 à 3 % par an (Figure 6) et elle a surtout conduit à une augmentation des énergies fossiles (gaz, pétrole, charbon).

Quelques chiffres permettent de se faire une idée des ordres de grandeur globaux. La puissance installée actuellement dans le monde correspond à une énergie d'environ 13 Gtep (gigatonnes d'équivalent pétrole) par an en énergie primaire, soit 546 Exa Joules par an (1 Exa = 10¹⁸). On peut en déduire le niveau de puissance correspondant qui est de l'ordre de 17 TW. Par comparaison, le Soleil déverse sur la planète une puissance colossale de 122 000 TW environ – mais cette puissance est

bien loin d'être utilisable (voir l'**Encart : « Quelques ordres de grandeur »**).

Les évolutions données à la Figure 6 pour la consommation d'énergie indiquent qu'il

QUELQUES ORDRES DE GRANDEUR

En 2013, la consommation d'énergie primaire mondiale était de 13 Gtep.

1 kg de pétrole correspond à 42 MJ

1 tep correspond à 42 GJ

L'énergie primaire totale correspond donc à 546.10¹⁸ J, soit 546 EJ (Exa Joules)

La puissance correspondante est obtenue en divisant l'énergie primaire totale par le nombre de secondes dans une année :

$$P = \frac{E}{T} = \frac{546 \cdot 10^{18}}{86\,400 \times 365} = 17,3 \text{ TW}$$

Cette puissance peut être comparée à celle que le Soleil déverse sur la Terre qui est de 122 000 TW.

sera difficile d'infléchir les évolutions tendanciennes de la consommation d'énergie dans le monde, car ces évolutions sont déterminées principalement par la démographie et par la recherche d'un niveau de vie meilleur dans tous les pays émergents.

2.2. Quelques éléments sur les émissions de CO₂ pour éclairer les enjeux

Un des objectifs pour l'avenir est de réduire les émissions de CO₂ issues de la production d'énergie pour réduire les effets de serre associés et éviter un réchauffement global excessif. La **Figure 7**, tirée d'une analyse réalisée par la compagnie BP, considère trois catégories de pays : les pays de l'Union européenne, ceux de l'OCDE, et les autres. On observe que l'Europe est en train de réduire sa consommation pour des raisons qui sont à la fois économiques (les

délocalisations industrielles) et politiques, et qu'en 2035 elle ne représentera plus que quelques pourcents de la consommation mondiale. Ses émissions de CO₂ seront alors très faibles. Par contre, les autres pays du monde vont augmenter leur consommation d'énergies fossiles, et donc leurs émissions de CO₂. Cette augmentation compensera largement toutes les réductions qui pourraient être réalisées en Europe. Quels que soient les efforts qui pourraient être déployés dans cette partie du monde, ils seront compensés par la croissance des émissions des autres pays et on peut en conclure que l'Europe ne devrait pas chercher à n'importe quel prix à être leader dans un domaine (celui de la réduction des émissions de gaz à effet de serre), dans lequel de toute manière sa part est déjà des plus faibles.

2.3. Éléments de comparaison

Le **Tableau 2** montre les indices d'émission de CO₂ de quelques pays à titre de comparaison. Les États-Unis ont un indice important de 16 tonnes de CO₂ par habitant et par an. La Chine est déjà à plus de 6 tonnes de CO₂, et elle prévoit d'atteindre un niveau de 10 tonnes de CO₂ en 2030 avant que ce niveau ne soit amené à baisser au-delà de cette date. En Allemagne le niveau d'émissions dépasse les 9 tonnes de CO₂ par habitant. En France le niveau se situe autour de 5,1. Une « performance » qui tient à deux causes : d'une part l'activité

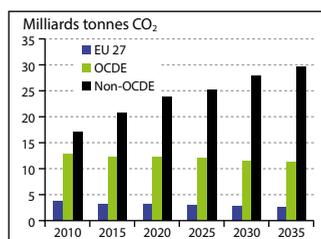


Figure 7

Prévisions d'émissions de CO₂ pour l'Europe des 27, l'OCDE, et les pays qui ne font pas partie de l'OCDE (adapté de BP). Les émissions de CO₂ de l'Union européenne continuent de baisser, celles du reste du monde augmentent. Le niveau des émissions des pays européens ne serait, en 2035, que de l'ordre de 6 % du total.

Tableau 2

Indice d'émission de CO₂ par an et par habitant. Il est nécessaire que l'objectif de réduction des émissions soit partagé par tous, notamment par les plus gros émetteurs.

	Population (Millions)	Émissions de CO ₂ (Mt)	Indice d'émissions de CO ₂ (tCO ₂ /habitant)
États-Unis	314	5074,14	16,15
Chine	1358	8521	6,07
Allemagne	81,92	755,27	9,21
France	65,43	333,89	5,1

Source : d'après Key world energy statistics (2014) International Energy Agency.

industrielle s'est réduite, et d'autre part, 75 % de l'énergie électrique est produite par le nucléaire, qui est une énergie décarbonée. La France est ainsi en bonne position par rapport aux émissions de CO₂ (**Figure 8**), juste derrière la Suède, où l'électricité est d'origine hydraulique ou nucléaire, et dans les deux cas décarbonée.

Ces données font bien ressortir les effets favorables de l'énergie nucléaire dans le domaine des émissions de gaz à effet de serre. Ces effets sont aussi mis en évidence dans une comparaison de l'évolution respective des énergies primaires utilisées en France et en Allemagne (**Figure 9**). L'énergie primaire en France provient à 53 % des

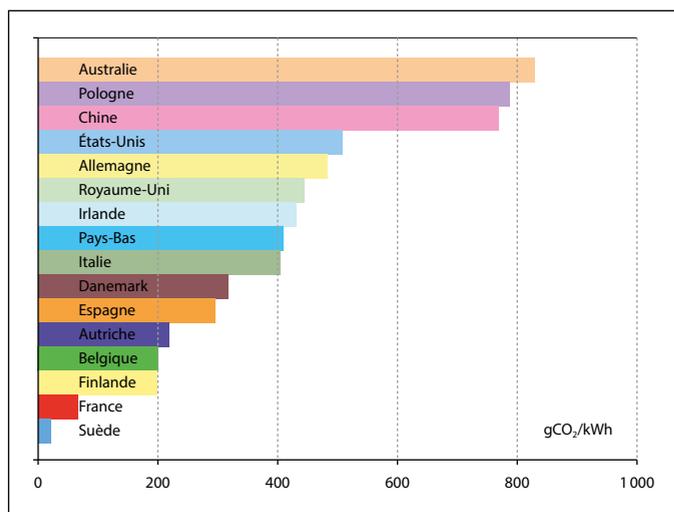


Figure 8

Émissions en gCO₂ par kWh pour l'année 2011. L'énergie électrique en France est faiblement carbonée.

Source : données IEA, CO₂ emissions from fuel combustion highlights, édition 2013.

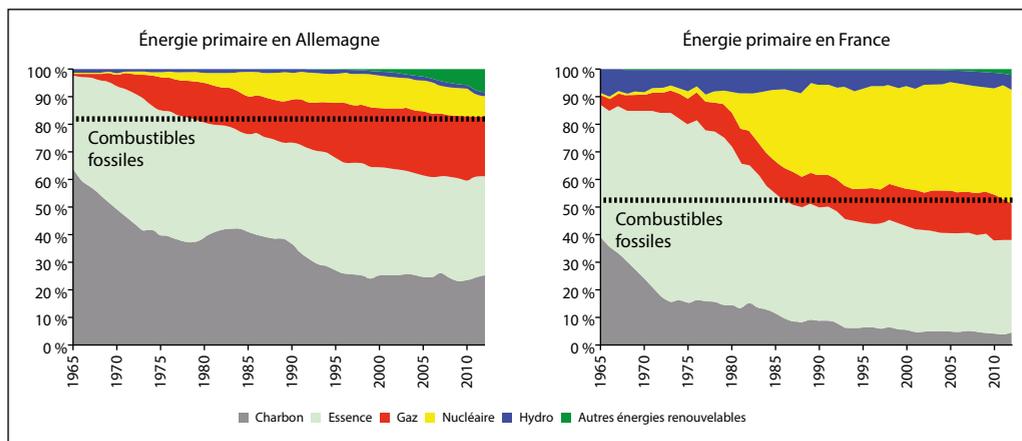


Figure 9

En Allemagne, l'énergie primaire est fournie à plus de 80 % par des combustibles fossiles contre 53 % en France, où 75 % de l'énergie électrique provient du nucléaire.

Source : données BP.

énergies fossiles, alors que l'Allemagne, malgré l'effort qui est fait pour développer les énergies renouvelables, dépend à plus de 80 % des énergies fossiles.

3 Les défis à relever dans le domaine des énergies renouvelables

La réduction des émissions de CO_2 nécessite le recours à des énergies décarbonées ou l'utilisation de méthodes de capture et stockage du CO_2 émis (CCS ou Carbon Capture and Storage). On pense alors immédiatement au déploiement à grande échelle d'énergies renouvelables, essentiellement éolien et solaire, et au développement de méthodes de stockage du CO_2 émis par les centrales fossiles. Ces deux moyens se heurtent cependant à des problèmes considérables qu'on va rapidement évoquer, qui sont le

passage à l'échelle, l'intermittence, la faible concentration des renouvelables et l'insertion dans le réseau.

3.1. Le problème du déploiement à grande échelle

On sait que le déploiement à grande échelle d'une installation ou d'un procédé industriel s'effectue toujours en plusieurs étapes : on commence par un prototype de laboratoire et on monte progressivement jusqu'à l'échelle 1. Cette progression d'échelle devrait par exemple être réalisée pour les procédés de capture et de séquestration du CO_2 , une des possibilités envisagée pour réduire les émissions (voir aussi le **Chapitre de M. Fontecave**, qui traite des possibilités de recyclage du CO_2 dans cet ouvrage *Chimie et changement climatique* (EDP Sciences, 2016). Aujourd'hui, les expériences qui conduisent

à la séquestration du CO₂ sont effectuées à très petite échelle ; les déployer à grande échelle (avec comme objectif de multiplier les capacités par 10 000) réclamerait évidemment des efforts considérables (Figure 10). D'une façon plus générale, le déploiement à grande échelle de technologies qui pourraient permettre la réduction des émissions de gaz à effet de serre demandera le même type d'évolution progressive.

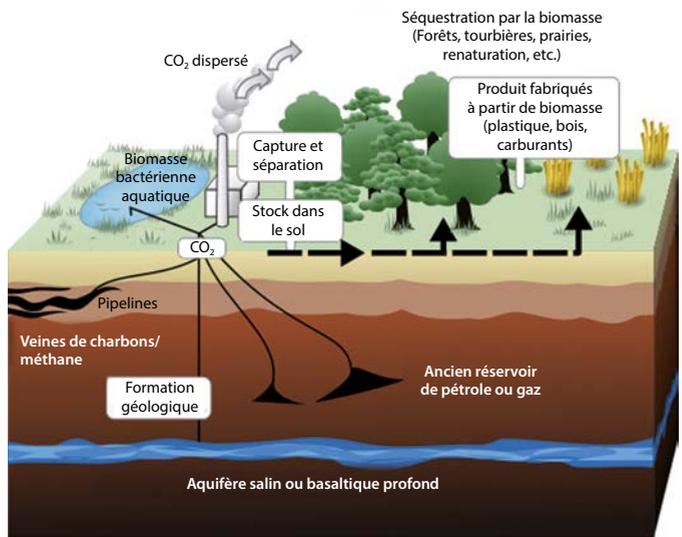


Figure 10

Les plateformes pétrolières commencent à se doter de la technologie CCS (Carbon Capture and Sequestration) ; le CO₂ produit sur la plateforme est réinjecté entre une couche de roche ultra saline et une roche couverture.
 Source : Wikipédia, licence CC-BY-SA-3.0,

3.2. Intermittence, dilution, intégration dans le réseau

Le déploiement des énergies renouvelables doit tenir compte de leur intermittence et de leur caractère diffus (leur forte dilution spatiale). Pour l'énergie éolienne par exemple, le facteur de charge est de 23 % (voir plus haut et le **Chapitre d'Y. Bréchet** dans *Chimie et changement climatique*). La Figure 11 reprend des données RTE (le gestionnaire du Réseau de Transport

d'Électricité) pour janvier et mai 2015, pour la production d'énergie électrique d'origine éolienne en France. On voit qu'elle est éminemment variable et pratiquement impré-

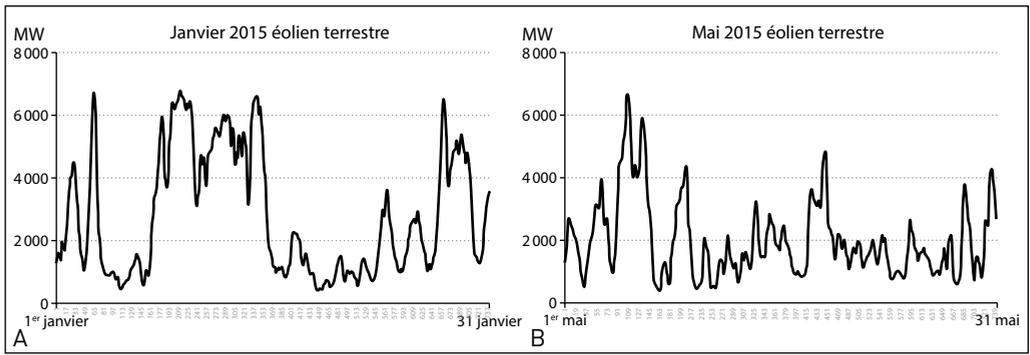


Figure 11

L'énergie produite par les éoliennes est extrêmement variable à l'échelle d'un mois (A : janvier et B : mai 2015, en France). La capacité de puissance éolienne installée en France au 1^{er} janvier 2015, légèrement supérieure à 9 000 MW, n'est jamais atteinte en réalité.

Source : données RTE.

visible. Il y a des périodes où le vent souffle et d'autres où il est pratiquement absent ; sur les 9 000 MW installés, on obtient des niveaux de 2 000 MW, ou des valeurs plus élevées de l'ordre de 6 000 MW, mais qui n'atteignent jamais les valeurs installées.

En moyennant les puissances produites sur toute l'Europe, on s'attend à un effet de « lissage ». Cet effet apparaît à la **Figure 12**, qui donne une vision de ce que pourrait être la puissance disponible au niveau européen en 2030 si on installait une puissance éolienne de 187,5 GW. Le calcul est réalisé en prenant les données disponibles dans sept pays européens pour les mois de novembre et décembre 2010 et en extrapolant au niveau de puissance nominale visé. On voit que le lissage n'est que très partiel car les régimes de

vent sont fortement corrélés en Europe. Cette simulation indique que le niveau de puissance reste inférieur à 15 % de la puissance installée pendant une dizaine de jours, ce qui nécessiterait de disposer de capacités de compensation pour répondre à la demande malgré la faiblesse de la production renouvelable.

L'introduction à grande échelle des énergies renouvelables intermittentes en remplacement des systèmes actuels de production d'électricité ne va pas pouvoir se faire sans poser des difficultés majeures. Cette insertion ne devrait être réalisée qu'avec beaucoup de prudence et après avoir bien pris la mesure des difficultés qu'elle va induire (voir l'**Encart** : « **Remplacer le nucléaire en France par les énergies renouvelables ?** »).

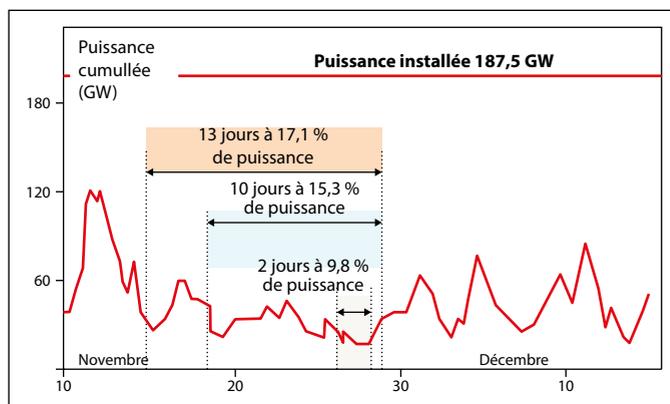


Figure 12

Puissance éolienne cumulée en GW sur un mois (novembre/décembre 2010) qu'auraient sept pays européens pour une puissance éolienne en 2030 qui serait triple de l'actuelle (187,5 GW au lieu de 65 GW). Les sept pays sont : Allemagne, Autriche, France, Espagne, Danemark, Irlande, Royaume-Uni.

Source : adapté de H. Flocard & JP Pervès, *Intermittence et foisonnement de l'électricité éolienne en Europe* (2012).

REEMPLACER LE NUCLÉAIRE EN FRANCE PAR LES ÉNERGIES RENOUVELABLES ?

Regardons le scénario : **descendre la production d'électricité par le nucléaire de 75 % à 50 %, et compenser cette diminution par les énergies renouvelables.**

L'examen des ordres de grandeur montre que :

- l'opération demanderait des surfaces considérables (**Tableau 3**) : il faudrait l'équivalent de la totalité de la surface de l'Île de France. Certes, on peut aussi utiliser des surfaces situées en dessous d'éoliennes, mais avec beaucoup de limitations ;
- le coût serait voisin de 300 milliards d'euros, en utilisant des systèmes éoliens et photovoltaïques optimisés. Ces calculs viennent de la revue *Problèmes économiques* (Grand D., Le Brun C., Vidil R. (2014). *Peut-on (vraiment) réduire la part du nucléaire ? Problèmes Économiques*, Octobre, p. 20-30).

Tableau 3

Comparaison en termes de surface de terrain et de coût des différentes énergies renouvelables envisagées pour remplacer le nucléaire en France pour aboutir à 50 %).

	Éolien terrestre	Éolien mer	Solaire photo-voltaïque	Thermique
Surface par GW installé (km ²)	142	80	32	0,32
Coût par GW installé (Md€)	1,99	3,33	3,74	1
Puissance à installer	50	19	35	42
Surface (km ²)	7092	1520	1 117	13
Coût (en G€)	99	63	131	42
Coût total				335 Md€

Par ailleurs, la gestion des réseaux électriques serait complètement bouleversée par l'existence de sources d'énergies aussi diversifiées et délocalisées. Les études prospectives proposent de faire appel au « numérique » (**Figure 13**) et aux possibilités ouvertes par les « réseaux intelligents » (voir le **Chapitre d'Y. Bréchet** dans *Chimie et changement climatique*).



Figure 13

Le « smartgrid » ou « réseau intelligent » peut aider à intégrer la production diffuse intermittente et éviter une déstabilisation du système électrique.

Source : Wikipedia, licence CC-BY-SA-3.0, JH Mora

3.3. La dilution des énergies renouvelables

La densité d'énergie que l'on peut produire par les éoliennes est limitée par leur efficacité, qui demande que ces

machines ne soient pas trop proches les unes des autres pour éviter des interactions entre les sillages respectifs et une réduction sensible du rendement (**Figure 14**).



Figure 14

Les éoliennes doivent être à distance les unes des autres pour fonctionner efficacement, ce qui explique la densité d'énergie relativement faible qu'elles peuvent produire.

Source : David McKay (2012).

La densité de puissance moyenne que l'on obtient dans ces champs d'éoliennes est typiquement de l'ordre de quelques watts par mètre carré (3 W/m^2). Les fermes d'éoliennes occupent de ce fait des surfaces importantes. Ainsi par exemple, le « Princess Amalia Wind Turbine Field » (Figure 15) produit 435 millions de kilowattheures, pour une capacité installée de 120 MW, et fonctionne



Figure 15

Le champ d'éoliennes offshore Princess Amalia aux Pays-Bas produit en moyenne une puissance de $3,5 \text{ W/m}^2$.

Source : Ad Meskens/Wikimedia Commons.

avec une densité de puissance moyenne de 3,5 W/m².

Si l'on voulait produire la totalité de l'énergie électrique consommée en France avec ce type d'éoliennes, il faudrait 1 241 champs équivalents à Princess Amalia, et cela nécessiterait une surface de 17 000 km², soit une bande côtière de 5 km équipée d'éoliennes sur l'ensemble des côtes françaises (**Figure 16**) !

Pour le photovoltaïque, on est un peu dans la même situation : tout ce qui est installé aujourd'hui offre une densité de puissance moyenne de l'ordre de 5 W/m² (**Figure 17**). Les travaux des laboratoires (notamment ceux réalisés par les physico-chimistes) laissent espérer des accroissements importants des rendements. La valeur assez modeste donnée plus haut est typique des fermes photovoltaïques qui sont actuellement opérationnelles.



Figure 16

Pour produire la totalité de l'électricité consommée en France avec de l'éolien, il faudrait équiper la bande littorale française (3 427 km) sur une largeur de 5 km.

Le solaire s'est beaucoup développé dans de nombreux pays comme l'Espagne, mais aussi en Allemagne dans le cadre de son programme actuel de « transition énergétique ». On peut aussi noter l'exploit remarquable qui consiste à faire voler un avion équipé de cellules solaires et à réaliser un tour du monde avec ce véhicule (voir l'**Encart : « Les énergies renouvelables à la conquête de l'aéronautique ! »**).



Figure 17

La densité d'énergie produite par les panneaux photovoltaïque est faible, autour de 5 W/m².

Source : David McKay (2012).

LES ÉNERGIES RENOUVELABLES À LA CONQUÊTE DU SECTEUR AÉRONAUTIQUE !

Il est intéressant de rappeler l'expansion considérable de l'aéronautique (**Figures 18 et 19**), et tenter une comparaison avec l'avion Solar Impulse 2. Les avions transportent aujourd'hui 4 000 milliards de passagers kilomètres par an à des vitesses de 900 km/h !



Figure 18

En soixante ans, l'évolution du secteur aéronautique a été considérable : aujourd'hui, plus de 4 000 giga passagers.km sont transportés par an !

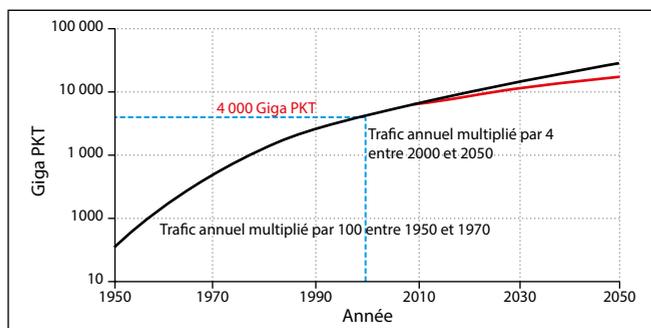


Figure 19

D'après les prévisions, le trafic annuel sera multiplié par quatre entre 2000 et 2050.

Le superbe avion solaire « Solar Impulse 2 » (**Figure 20**), qui fait actuellement le tour du monde, tire son énergie de cellules photovoltaïques. Avec ses 72 mètres d'envergure et ses 633 kg de batterie, Solar Impulse 2 s'est arrêté en juillet 2015 à Hawaï après une belle traversée de cinq jours et cinq nuits à une vitesse moyenne de 61,19 km/h.



Figure 20

L'avion Solar Impulse 2 est équipé de cellules photovoltaïques qui lui permettent de voler jusqu'à 100 km/h. Il a réalisé une traversée de 8 924 km du Pacifique depuis le Japon en cinq jours et cinq nuits.

Source : Solar Impulse/Revillard/Rezo.ch.

L'exploit de Solar Impulse 2 est remarquable, mais la « distance à l'objectif », qui serait d'assurer la totalité du trafic aérien avec des véhicules solaires, reste presque incommensurable (**Figure 21**) : elle nécessiterait un accroissement par un facteur 100 millions en nombre de passagers.kilomètres, et conduirait à remplacer tous les passagers par des pilotes de très haut niveau.

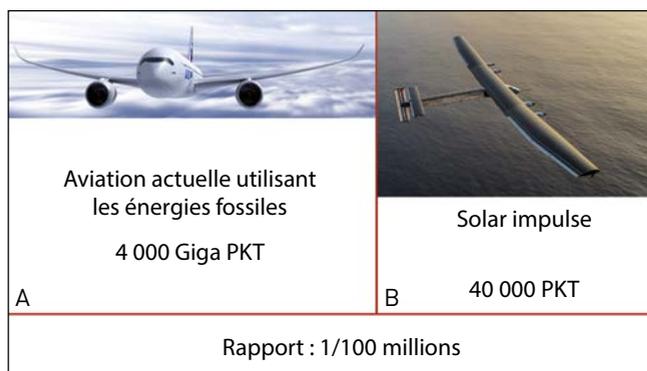


Figure 21

A) Aviation actuelle utilisant les énergies fossiles, 4 000 giga passagers.km transportés par an ; B) avion solaire Solar Impulse 2, 40 000 passagers.km transportés par an, soit 100 millions de fois moins que pour l'aviation utilisant les énergies fossiles.

4 Le rôle de la chimie dans la transformation du système énergétique

La chimie joue déjà un rôle considérable dans le domaine de l'énergie. C'est la chimie qui peut permettre :

- de **stocker de l'énergie** ou la récupérer par diverses méthodes : synthèse et utilisation d'hydrogène, récupération et utilisation du gaz carbonique CO_2 ;
- de **produire des biocarburants et des carburants de synthèse**. Ce sujet est notamment étudié à l'Institut Français du Pétrole Énergies Nouvelles (IFPEN) à partir des connaissances acquises dans le domaine du pétrole qu'il convient de transposer au traitement de la biomasse (**Figure 22**) ;

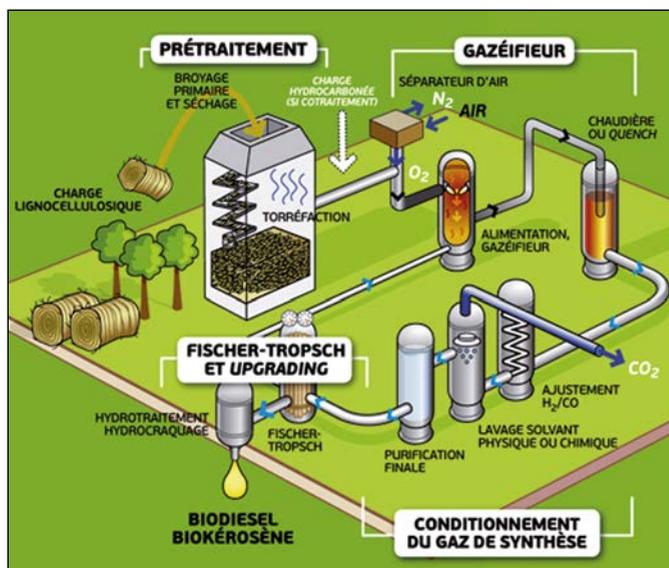


Figure 22

Le projet BioTfuel à Dunkerque : développement d'un nouveau procédé de production de biocarburants à partir de déchets agricoles rassemblant des organismes de R&D (IFPEN et le CEA) et des industriels (Axens, Sofiprotéol, Total et ThyssenKrupp Industrial Solutions).

Source : IFPEN.

- d'**élaborer de nouveaux matériaux** pour les cellules photovoltaïques, pour des super-condensateurs, des batteries, etc. (**Figure 23**) ;
- d'**améliorer l'efficacité énergétique du bâtiment et de la mobilité** (**Figure 24**).

Nous allons passer en revue quelques-uns de ces aspects dans ce qui suit.



Figure 23

De nouveaux matériaux doivent être développés pour l'énergie : l'entreprise française Saft conçoit des batteries de haute technologie pour l'industrie.

Crédit : Saft D. Edmunds CAPA Pictures.



Figure 24

De nombreux travaux sont menés sur l'amélioration de l'efficacité énergétique pour la mobilité et le bâtiment.

Source : IFPEN.

4.1. Le stockage de l'énergie

Les stations de transfert d'énergie par pompage

Le principal procédé de stockage de l'énergie électrique utilise le principe des Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP). Ce procédé utilise deux réservoirs (deux lacs) situés à des altitudes différentes mais en communication l'un avec l'autre. On fait chuter de très grandes quantités d'eau du lac supérieur sur une turbine pour récupérer de l'énergie ; du lac inférieur, on remonte l'eau dans le lac supérieur pour stocker l'énergie et l'utiliser ultérieurement. Le barrage de Grand'Maison (**Figures 25 et 26**) est un exemple de ce type d'installation. La France dispose d'une capacité totale de stockage de 4,9 GW, relativement faible par rapport aux 129 GW installés avec une durée de fonctionnement de l'ordre de la vingtaine d'heures correspondant à 34 GWh (à comparer aux 540 TWh de la consommation annuelle d'électricité).

Stocker l'énergie grâce aux batteries

Le stockage d'énergie au moyen de batteries est l'une des solutions les plus prometteuses (**Figure 27**). De nombreux laboratoires travaillent sur ce sujet, important en premier lieu pour les applications à la mobilité (transport automobile) mais aussi pour le stockage de masse de l'énergie. Pour cette dernière application, les batteries sont moins performantes que les STEP, mais les développements futurs pourraient changer cette situation.

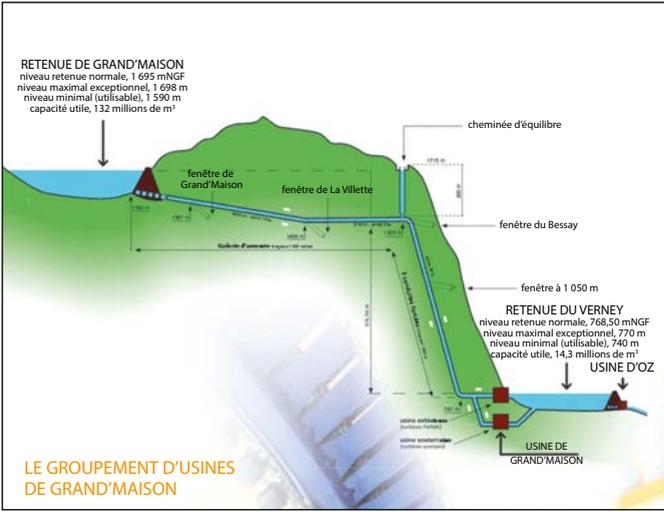


Figure 25

Dans une Station de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP), lorsque la demande d'électricité est basse, le surplus d'énergie disponible est utilisé pour actionner une pompe qui permet de transférer de l'eau du bassin inférieur vers le bassin supérieur, et inversement en cas de forte demande d'électricité.

Source : EDF.



Figure 26

Le barrage de Grand'Maison, un exemple de Station de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) en France.

Source : EDF.

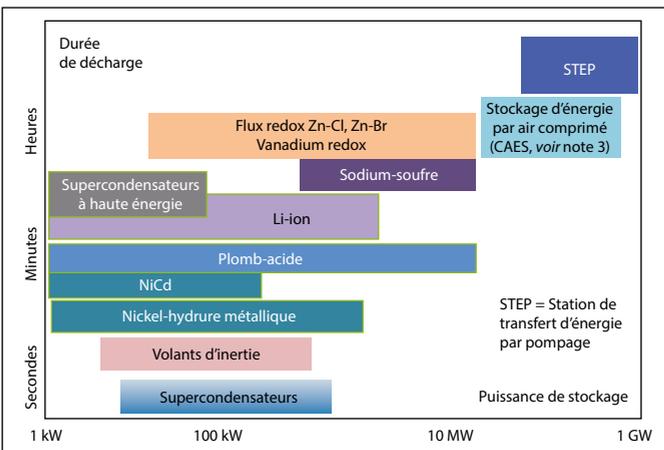


Figure 27

Comparaison des temps de décharge et des niveaux de puissance nominale pour diverses technologies de stockage de l'énergie électrique.

Source : d'après Dunn B., Kamath H., Tarascon J.-M. (2011).

Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices, *Science*, 334 : 928-935.

La recherche sur les batteries pour le stockage de l'énergie est extrêmement active. Cependant, les principaux indices de performances, l'énergie par unité de masse et la puissance, restent encore relativement faibles (Figure 28). Les nombreuses qualités à priori des batte-

ries concernant leur facilité d'emploi justifient les efforts importants qui sont conduits. Les batteries Lithium-air² (Figure 29A) devraient à terme permettre d'atteindre des énergies par unité de masse beaucoup plus importantes que celles disponibles actuellement, mais elles ne sont pas encore suffisamment fiables. Une autre solution prometteuse est présentée par les « batteries à écoulement », qui utilisent des couples

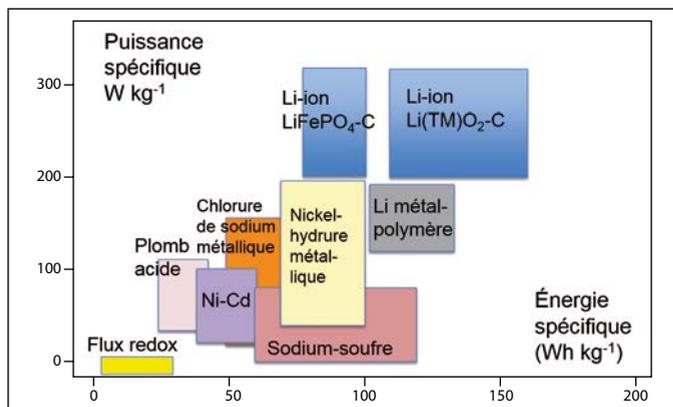


Figure 28

Densités de puissance et d'énergie massiques pour différents types de batteries. Les énergies et puissances par unité de masse restent faibles lorsqu'on les compare à celles des énergies fossiles.

Source : d'après Dunn B., Kamath H., Tarascon J.-M. (2011). Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices, *Science*, 334 : 928-935.

2. Batterie Lithium-air : batterie dans laquelle une électrode au lithium est couplée à une électrode de pile à combustible. Elle met en œuvre le couple lithium/dioxygène. Le dioxygène est disponible et inépuisable sans être stocké dans l'accumulateur. Cette batterie permet de concentrer une densité d'énergie massique de l'ordre de 1 000 Wh/kg, mais elle présente un verrou technologique majeur : la formation de superoxydes qui dégradent rapidement la batterie. Voir aussi : *Chimie et transports*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2014.

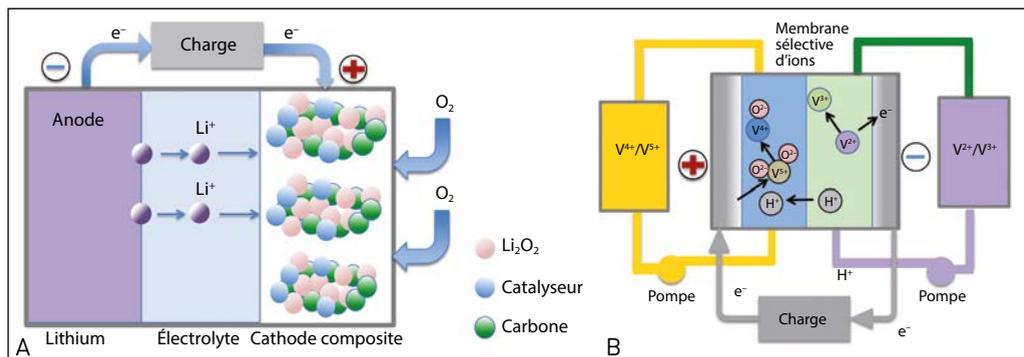


Figure 29

A) De nombreux travaux sont menés sur les batteries Lithium-air, dont le schéma de fonctionnement est donné ici, car l'énergie produite par unité de masse est beaucoup plus importante que pour les autres types de batteries ; B) les batteries à écoulement renouvellent l'électrolyte directement par pompage.

redox qu'on fait fonctionner en pompant directement les réactifs dans la batterie (Figure 29B) ; leur renouvellement s'effectue ainsi en continu. Cependant, les densités de puissance et d'énergie massiques sont relativement faibles.

Le stockage par le procédé « Power to Gas »

Dans le procédé de stockage dit « Power to Gas » (Figure 30), on utilise l'énergie excédentaire produite par les sources renouvelables pour

produire de l'hydrogène par électrolyse (voir le **Chapitre de P. Mauberger** dans *Chimie et changement climatique*). L'hydrogène peut ensuite être combiné à du gaz carbonique pour éviter que ce dernier ne rejoigne l'atmosphère ; on peut ainsi produire du méthane CH_4 , qui peut être stocké pour une réutilisation ultérieure.

La **Figure 31** représente l'installation de Falkenhagen en Allemagne. Cette installation d'une puissance de 2 MW uti-

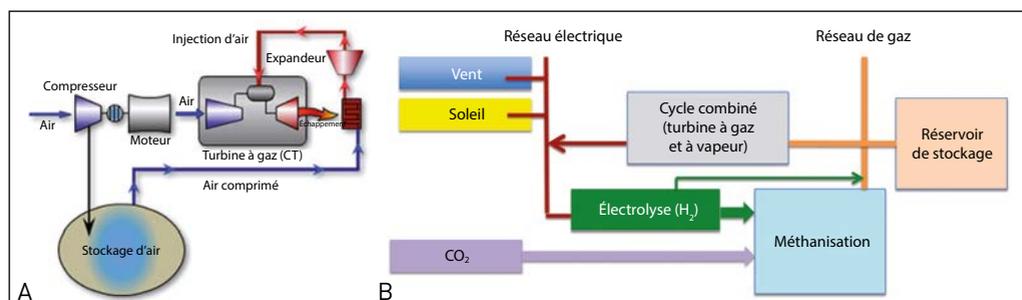


Figure 30

A) Le stockage d'air comprimé et l'utilisation d'une turbine à gaz permettent de stocker de l'énergie ; B) le « Power to Gas » est un type de stockage d'énergie : de l'énergie électrique renouvelable est convertie en hydrogène par électrolyse, et cet hydrogène peut ensuite être injecté dans le réseau de gaz ou converti en méthane ou gaz de synthèse.



Figure 31

L'usine de Falkenhagen en Allemagne utilise l'énergie éolienne et l'électrolyse (installation Hydrogenics) pour transformer l'eau en hydrogène, qui est ensuite injecté dans le système existant de transport de gaz naturel régional.

Source : Courtesy of Energy Storage GmbH

lise l'énergie éolienne pour électrolyser de l'eau et produire de l'hydrogène. Le rendement de l'opération est un peu supérieur à 50 %.

La situation mondiale des installations de stockage d'énergie électrique

La **Figure 32** résume la situation des installations de stockage en service dans le monde. Les STEP dominent largement ; les technologies du stockage à air comprimé avec de turbines à gaz pour récupérer de l'énergie³ sont

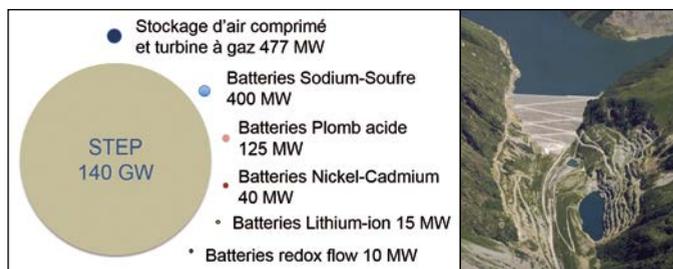


Figure 32

Comparaison du nombre de mégawatts installés des différents modes de stockage de l'énergie. Le stockage centralisé par STEP est actuellement environ trois fois moins cher par mégawatt installé qu'un système de stockage par batterie. La STEP de Grand'Maison (photo) a une capacité de stockage de 1,7 GW pendant 20h, soit 34 GWh (à comparer aux 540 TWh consommés par an).

3. Le principe du CAES (Compressed Air Energy Storage) repose sur l'élasticité de l'air : l'air est d'abord comprimé via un système de compresseurs à très haute pression (100 à 300 bars) pour être stocké dans un réservoir (cavités souterraines par exemple). Pour récupérer cette énergie potentielle, l'air est détendu dans une turbine qui entraîne un alternateur. Comme l'air se réchauffe pendant sa compression, la chaleur à la sortie du compresseur peut être récupérée via des échangeurs et stockée afin d'être utilisée pour réchauffer la turbine.

également utilisées mais dans une moindre mesure. Quant aux procédés à batteries, on voit qu'ils sont encore peu développés, mais plusieurs systèmes sont essayés, signe de l'intérêt qui est porté à ces systèmes à plus long terme.

4.2. Les biocarburants

Lutter contre le changement climatique, c'est en particulier, et même surtout, réduire l'utilisation des combustibles fossiles. Le développement des biocarburants s'inscrit dans cette stratégie.

En partant de la biomasse (les végétaux), on étudie plusieurs procédés de synthèse d'hydrocarbures. Les procédés de « génération 2 » utilisent les déchets agricoles riches en lignocellulose⁴. La **Figure 33** rappelle les principales voies de transformation de la biomasse en biocarburant.

L'utilisation d'algues pour la production de biocarburants pourrait présenter beaucoup d'avantages économiques. Elle fait l'objet de recherches au niveau des laboratoires (**Figure 34**).

La **Figure 35** compare les économies faites par l'utilisation des biocarburants en matière

4. Lignocellulose : matière première présente dans les déchets agricoles (paille de blé, résidus d'élagage, déchets de bois de scierie...). Elle contient trois types de polymères, des molécules assez longues qui font la structure même de la plante : la cellulose (constituée de molécules de glucose attachées les unes aux autres), la lignine (qui rigidifie la plante), et entre les deux, des polymères à base de sucre appelés hémicelluloses.

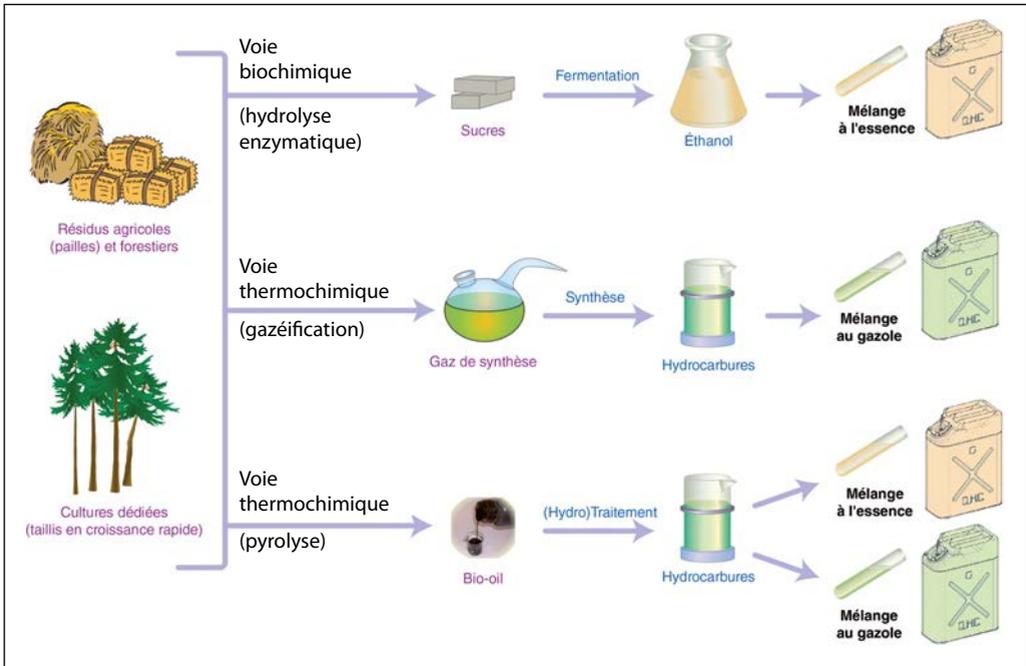


Figure 33

Les biocarburants de 2^e génération utilisent comme matière première des résidus agricoles et forestiers, des cultures dédiées (notamment de peupliers) et des déchets organiques (boues de stations d'épuration par exemple) pour produire de l'éthanol ou des hydrocarbures.

Source : IFPEN.

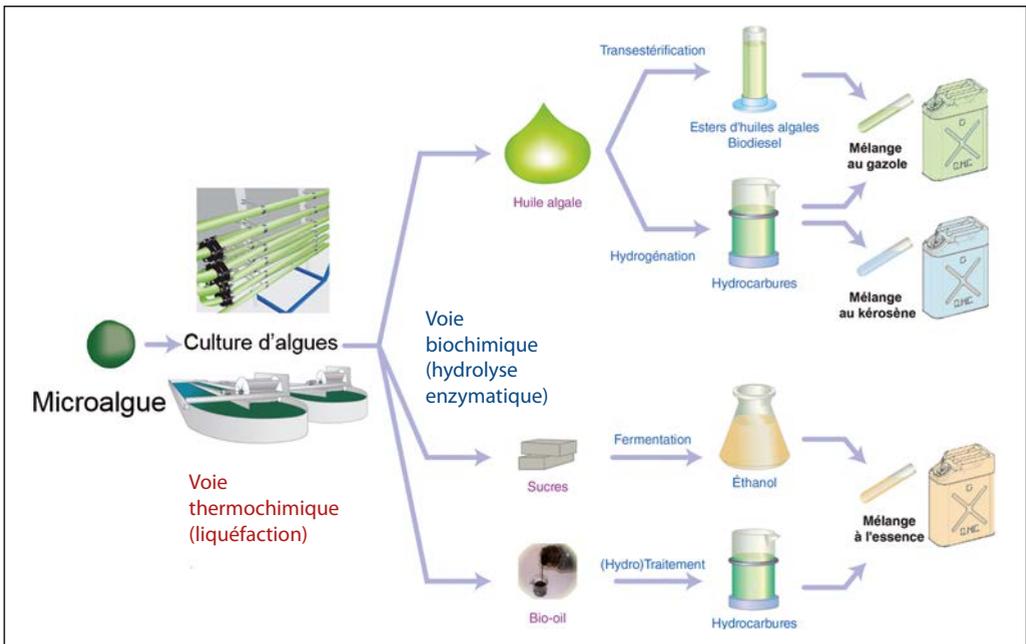


Figure 34

Encore au stade de la recherche en laboratoire, la production de biocarburants à partir d'algues pourrait être prometteuse à plus long terme.

Source : IFPEN.

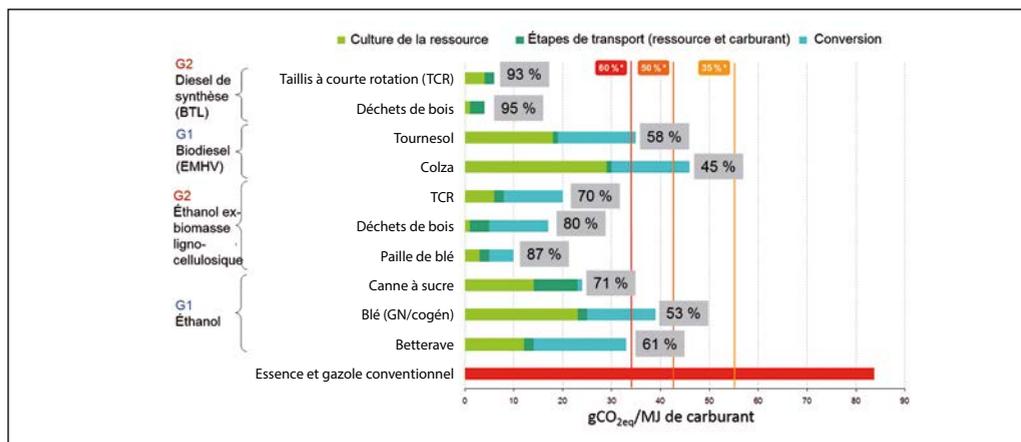


Figure 35

Réduction bilan de gaz à effet de serre (Well to Wheel) des biocarburants par rapport aux carburants fossiles de référence [83,8 gCO₂eq/MJ]. G1 = culture spécifique ; G2 = utilisation des déchets végétaux.

Source : directive 2009/28/CE, IFPEN.

de rejets de CO₂ dans l'atmosphère, selon la ressource végétale utilisée. Les procédés « génération 2 » sont de ce point de vue bien plus performants que les procédés qui font intervenir des cultures spécifiques (betterave, blé, canne à sucre de la génération 1).

4.3. La chimie et l'efficacité énergétique

La chimie joue un rôle majeur dans toutes les actions qui consistent à augmenter l'efficacité énergétique. On examine dans ce qui suit les progrès réalisés en aéronautique, dans le domaine automobile et dans celui des matériaux de construction.

4.3.1. Pour l'aéronautique

La consommation en carburant des avions a été réduite d'une façon sensible avec l'amélioration des moteurs,

l'allègement des structures des avions et l'augmentation des rendements aérodynamiques⁵ (Figure 36). Les avions actuels consomment de 3 à 5 litres par 100 km et par passager. Dans un avion qui vole et évolue à 900 km/h, on consomme aujourd'hui à peu près ce que l'on consomme dans une voiture.

Les progrès spectaculaires proviennent des développements réalisés sur les matériaux, l'aérodynamique et la propulsion (Figure 37). L'efficacité énergétique résulte d'un travail patient d'amélioration des performances à tous les niveaux.

5. Voir aussi *Chimie et transports, vers des transports décarbonés*, chapitre de S. Candel, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2014.

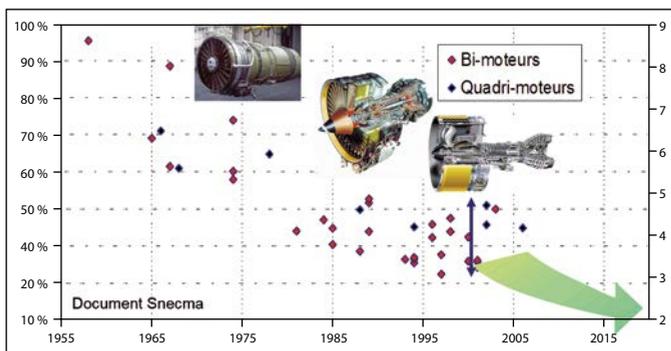


Figure 36

Évolution de la consommation des avions par passager.km (année de référence : 1955, indice = 100 %). Entre 1960 et 2000, les progrès technologiques ont permis de réduire la consommation des avions (donc la formation de CO₂) de 60 %.

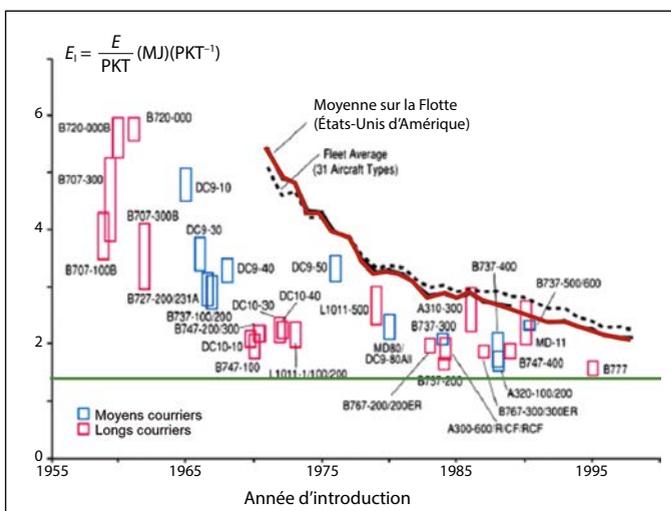


Figure 37

Évolution de l'indice énergétique global : des progrès considérables ont été réalisés par un travail sur les matériaux de construction des avions, sur l'aérodynamique et sur la propulsion.

Source : d'après Lee J.J. (2010). *Energy conversion management*, 51 : 189-196.

4.3.2. Pour l'automobile

L'efficacité énergétique est aussi un objectif permanent de l'industrie automobile. On vise des consommations de 2 litres aux 100 km dans les voitures équipées de moteurs classiques, en particulier par l'utilisation de nouveaux matériaux plus légers (Figure 38). Les véhicules électriques ou les véhicules hybrides (mixtes fioul/électricité) seront bien placés pour réussir ces objectifs d'économie de carburant et donc d'émission de CO₂ dans l'atmosphère (Figure 39).

4.3.3. Pour le bâtiment

Un gisement d'économie d'énergie est le domaine du bâtiment⁶. Les nouveaux matériaux isolants permettent de réaliser des progrès dans ce domaine : « matériaux », c'est-à-dire encore une fois « chimie » ! Celle-ci participe en effet à l'amélioration de la performance des matériaux de construction existants et à l'élaboration de nouveaux matériaux toujours plus per-

6. Voir aussi *Chimie et habitat*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2011.



Figure 38

Des réductions de consommation importantes peuvent être obtenues sur des véhicules classiques équipés de moteurs thermiques ou hybrides, comme les projets de véhicules basse consommation (ici un prototype de PSA Renault à 2L/100 km).

Source : Wikipédia, licence CC-BY-SA-2.0, Ben from LONDON, United Kingdom.

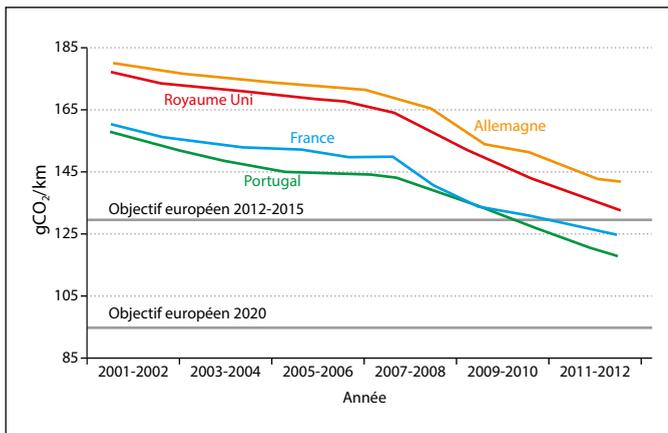


Figure 39

La tendance est à la baisse concernant les émissions de CO₂ par km pour les véhicules neufs dans quatre pays de l'Union européenne.

formants. L'objectif est de réduire la demande d'énergie par unité de surface des bâtiments neufs et anciens, et

pour cela d'assurer une meilleure isolation (Figure 40). Avec de nouveaux types de matériaux et de nouvelles configurations, on atteint des

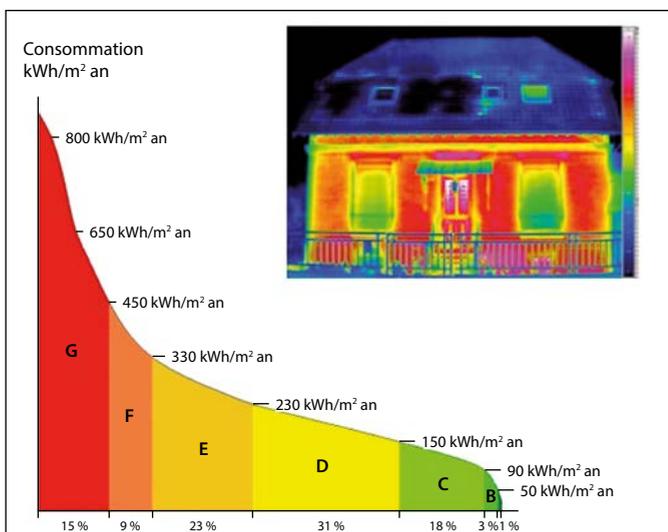


Figure 40

La lecture du diagnostic de performance énergétique, qui évalue la consommation d'énergie d'un bâtiment, est facilitée par une étiquette énergie à sept classes de A à G (A correspondant à la meilleure performance, G à la plus mauvaise).

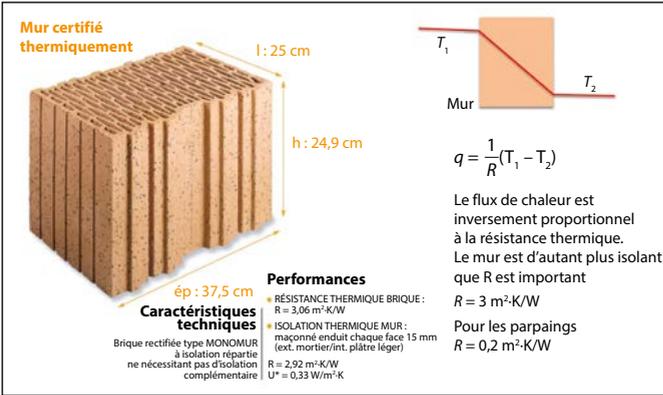


Figure 41

Plus la résistance thermique d'un mur est élevée, plus celui-ci est isolant. La résistance thermique de cette brique est de 3 m²·K/W, alors que celle d'un parpaing est de 0,2 m²·K/W.

résistances thermiques (Figure 41) de l'ordre de 3 m²·K/W quinze fois plus élevée que celles des matériaux habituels !

Engager de façon décisive un effort de recherche, développement, innovation et industrialisation dans le domaine de l'énergie

La transformation du système énergétique demande un effort considérable de recherche et développement qui puisse faire émerger des solutions innovantes pour régler des questions qui sont aujourd'hui très imparfaitement résolues. La chimie doit évidemment jouer un rôle majeur dans cet effort.

Utiliser toutes les ressources de la science et de la technologie ainsi que l'imagination et la créativité des chercheurs et des ingénieurs pour trouver des solutions, réaliser des innovations, concevoir des ruptures, constitue une impérieuse nécessité. Dans la transformation du système énergétique qu'il faut anticiper pour répondre aux risques du changement climatique, on peut affirmer clairement les rôles essentiels

et complémentaires de la science, de la technologie et de l'industrie.

Quelques références

- Mackay D. (2012). *L'énergie durable, pas que du vent !*, De Boeck.

- Mosseri R., Jeandel C. (2013). *L'énergie à découvert*, CNRS Éditions.

- Rapports récents de l'Académie des sciences : *La recherche scientifique face aux défis de l'énergie*, du Comité de prospective en énergie de l'Académie des Sciences, EDP Sciences, 2012 ; *Éléments pour éclairer le débat sur les gaz de*

schiste, Avis de l'Académie des sciences, 15 novembre 2013 ; Avis de l'Académie des sciences sur la transition énergétique, 6 janvier 2015 ; Déclaration conjointe sur la transition énergétique en France et en Allemagne, 10 juillet 2015 ; Avis de l'Académie des sciences *Changement climatique et transformation du système Énergétique*, 3 novembre 2015.

- Lee J.J. (2010). *Energy conversion management*, 51 : 189-196.

- Dunn B., Kamath H., Tarascon J-M. (2011). Electrical Energy Storage for the Grid: A Battery of Choices. *Science*, 334 : 928-935.

Les microalgues : pour quoi faire ?

Jack Legrand est professeur à l'Université de Nantes. Il a créé en 2002 le Laboratoire de Génie des Procédés - Environnement - Agroalimentaire (GEPEA)¹, UMR CNRS 6144, entre l'Université de Nantes, l'École des Mines de Nantes et ONIRIS, qu'il dirige.

1 Le monde des microalgues et des cyanobactéries

1.1. Comment fonctionnent-elles ?

Les cyanobactéries et les microalgues sont deux organismes différents d'un point de vue biologique puisque les premières sont procaryotes¹ et les autres eucaryotes². Quand on parle de microalgues et de leur valorisation, on intègre ces deux micro-organismes puisque tout deux sont des micro-organismes photosynthétiques (**Figure 1**).

La photosynthèse permet l'utilisation du carbone minéral, donc du CO₂, pour le métabolisme de l'organisme. Comme

les plantes supérieures³, à côté du CO₂, les microalgues utilisent d'autres nutriments (le phosphate, les nitrates, etc.), qu'il faut prendre en considération pour les analyses des cycles de vie⁴ et de la production de ces microalgues.

L'énergie à la base de ces processus basés sur la photosynthèse est l'énergie solaire. Plus précisément, c'est la partie visible du spectre qui est utilisée. Se pose donc le problème de l'autre moitié du spectre, et notamment du rayonnement infrarouge. Il faut du Soleil pour produire des algues, mais il ne faut pas trop de température non plus. Dans nos régions, on ne cultive pas les algues l'hiver,

1. www.gepea.fr

1. Procaryote : cellule ne possédant pas de noyau.

2. Eucaryote : cellule possédant un noyau qui renferme son matériel génétique.

3. Plantes supérieures : plantes se reproduisant à l'aide de graines et non de spores comme les algues.

4. Analyse du cycle de vie : étude de l'impact environnemental d'un produit à sa conception, pendant son utilisation, et en fin de vie.

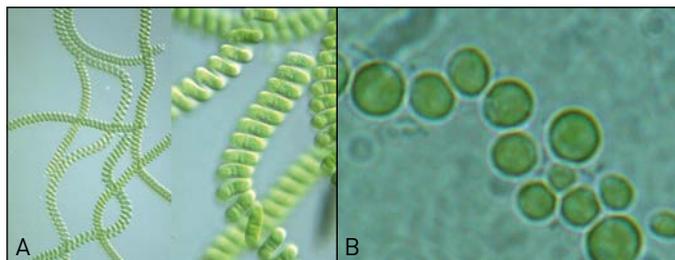


Figure 1

La croissance des microalgues vertes se fait par photosynthèse en milieu entièrement minéral, sans apport d'un substrat organique (ce sont des organismes autotrophes), par absorption en milieu aqueux des minéraux nécessaires et du carbone inorganique environnant grâce à la lumière captée. A) cyanobactérie : *Spirulina platensis* ; B) microalgaue : *Chlorella vulgaris*.

et dans la Chine du Sud, on ne cultive pas les algues l'été... Tous ces paramètres sont importants à contrôler pour la production industrielle de ces microalgues.

Les microalgues ont été parmi les premières espèces présentes sur Terre ; on parle de 4 milliards d'années. Les **Figures 2** et **3** montrent la diversité des microalgues et cyanobactéries ; elles sont présentes dans les mers,

mais aussi dans les zones terrestres humides. Cette très grande diversité conduit à un grand potentiel d'exploitation sur lequel nous reviendrons plus loin.

1.2. La photosynthèse, première source d'énergie chez les microalgues

La photosynthèse est un mécanisme extrêmement répandu dans le monde vivant, mise en œuvre par une très grande diversité de mécanismes biochimiques. Pour les plantes supérieures, ces mécanismes réalisent une meilleure efficacité de l'utilisation de la photosynthèse, donc une productivité accrue. Celle-ci peut encore être améliorée, comme on le verra plus loin.

Les microalgues sont constituées des trois grandes catégories de macromolécules de la biologie : les protéines, les carbohydrates (amidon, sucres, glucose, polysaccharides) et les lipides (glycérols, acides gras saturés ou non).

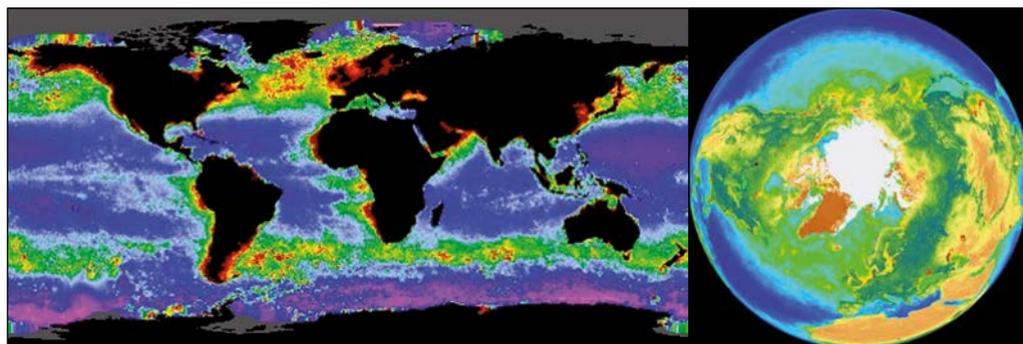


Figure 2

Présence et abondance des microalgues et cyanobactéries en fonction des régions océaniques du monde : une biodiversité à peine explorée (30 000 espèces décrites, 200 000 à 1 million estimées). En rouge sur la carte se distinguent les zones largement peuplées, c'est-à-dire les régions présentant une modification de pH suite à l'absorption de CO_2 par les microalgues.

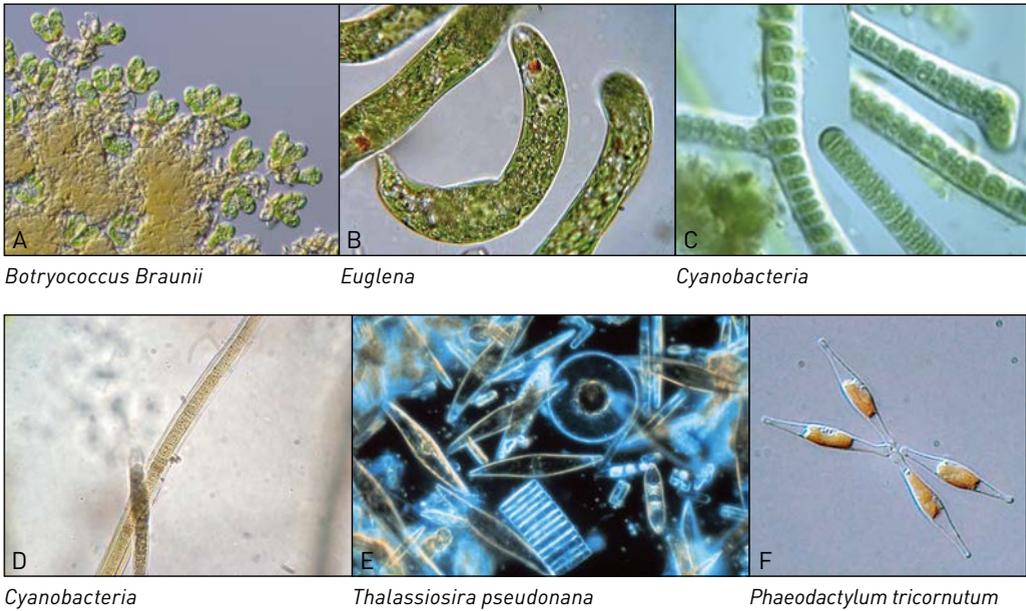


Figure 3

Une grande variété d'espèces de microalgues, précurseurs de la vie sur Terre, peuplant notre planète depuis 4 milliards d'années.

Sources : Wikipédia, Creative Commons : A) CC-BY-SA-3.0, ja ; B) CC-BY-SA-3.0, Deuterostome ; D) CC-BY-SA-3.0, Kristian Peters ; F) CC-BY-2.5 Image courtesy of Alessandra de Martino and Chris Bowler, Stazione Zoologica and École Normale Supérieure

Dans le monde, beaucoup de recherches appliquées sont consacrées aux microalgues pour la production de lipides en vue de disposer de vecteurs énergétiques (carburants). L'exploitation des microalgues conduit aussi à la production de pigments ; ces pigments peuvent avoir des applications dans certains domaines médicaux ou cosmétiques.

Dans une réaction photosynthétique, l'énergie nécessaire pour la transformation chimique est fournie par la lumière. Ce peut être la lumière solaire – comme dans les processus vivants – ou une lumière artificielle pour certaines applications à forte valeur ajoutée. Les réactions photochimiques utilisées pour

les applications sont réalisées par la matière vivante : on fournit la lumière et les nutriments à un système vivant, et celui-ci effectue la transformation chimique que l'on recherche. En pratique, la matière vivante est apportée sous forme d'inocula de souches⁵, en l'occurrence récupérées dans la biodiversité des algues et des cyanobactéries. Ces procédés produisent ensuite des macromolécules selon les processus naturels.

La **Figure 4** donne l'exemple du bilan de la réaction photosynthétique d'une microalgue *Chlamydomonas reinhardtii*.

5. Souche : population microbienne issue d'une même souche après divisions successives.

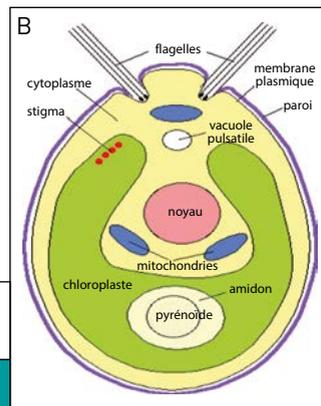
Figure 4

Équation bilan de la photosynthèse par la microalgue *Chlamydomonas reinhardtii*, dont le schéma simplifié indique en vert le chloroplaste, lieu de la photosynthèse.



A

1 kg CO₂ → 0,6 kg biomasse



Approximativement, le bilan de la réaction est : **pour 1 kg de CO₂, on produit 0,6 kg de biomasse** ; ce chiffre est très peu variable d'une espèce à une autre.

Pour les microalgues, la photosynthèse a lieu dans le chloroplaste⁶. La nuit, les microalgues respirent et utilisent une partie de leurs réserves pour retransformer l'oxygène en CO₂. Quand on parle de productivité, il faut tenir compte des cycles jour/nuit. Par ailleurs, les pigments jouent un rôle biologique extrêmement important car l'énergétique cellulaire en dépend. En fonction des conditions d'éclairage, en fonction de la saison, etc., les cellules adaptent leurs pigments. Ces mécanismes doivent être compris afin d'optimiser les procédés de culture de ces microalgues.

On peut ramener la chimie de tous les procédés photosynthétiques à ceci : on réalise la photolyse de l'eau, ce qui produit des protons et de l'énergie, qui est utilisée pour produire les macromolécules. Cela est réalisé par la nature,

6. Chloroplaste : organite présent dans le cytoplasme des cellules végétales eucaryotes photosynthétiques. La photosynthèse a lieu au sein de ces micro-organismes.

et nous essayons de le domestiquer en laboratoire puis en faire des procédés industriels.

La **Figure 5** donne l'évolution de la productivité en biomasse en fonction de l'éclairage. On observe une phase de croissance puis on arrive à un optimum et ensuite à un régime de photoinhibition⁷, liée au fait que la microalgue adapte ses pigments de manière à se protéger quand elle a trop d'ensoleillement. Le processus de photosynthèse conduit à la production de molécules de type carbohydrates, protéines ou lipides grâce au cycle de Calvin⁸, qui permet la transformation du CO₂ en macromolécules plus ou moins complexes suivant les métabolites recherchés.

7. Photoinhibition : processus par lequel la lumière diminue la vitesse de la photosynthèse chez les micro-organismes photosynthétiques.

8. Cycle de Calvin : ensemble de réactions biochimiques ayant lieu dans le cytoplasme des micro-organismes photosynthétiques, qui utilisent l'énergie solaire stockée après la photosynthèse sous forme d'ATP (adénine triphosphate) et de NADH (nicotinamide adénine dinucléotide). Ces transporteurs énergétiques sont utilisés par l'organisme pour métaboliser le CO₂ en macromolécules (protéines, polysaccharides, lipides).

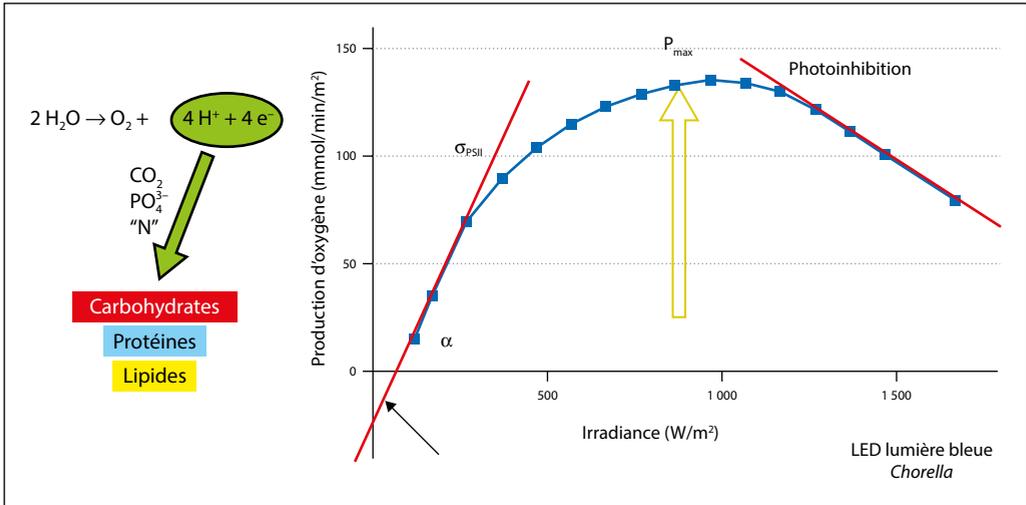


Figure 5

Productivité photosynthétique de la biomasse (espèce *Chlorella*) en fonction de l'éclairement, montrant l'existence d'un optimum avant photoinhibition.

Source : G. Dismukes, Princeton.

1.3. Les applications des microalgues de culture

Les applications industrielles des microalgues sont aujourd'hui l'aquaculture, les compléments alimentaires et les cosmétiques (Figure 6). D'autres applications sont à l'étude ou en émergence, à savoir les carburants (mais

à un horizon beaucoup plus lointain), ou encore l'alimentation animale ou humaine. La question à résoudre est celle de l'extrapolation des procédés pour permettre la production de masse des algues. Le débat technique est ouvert sur le type de système de culture à mettre en œuvre.



Figure 6

Des applications variées dans des domaines clés [alimentation humaine et animale, pharmacie, cosmétiques, aquaculture...] expliquent la nécessité de développer la production de microalgues à plus grande échelle.

Sources : pot de spiruline : Nutrex Hawaii ; spirulysat : Algosource/Alpha Biotech.

2 Produire et valoriser les microalgues

2.1. Les systèmes de culture des microalgues

Si l'on utilise directement les microalgues naturelles, on n'a pas de question technique à se poser sur le procédé. Mais pour une filière de production industrielle, il faut comprendre en détail et contrôler ce que fait la nature et pouvoir l'extrapoler, éventuellement en apportant des modifications aux microalgues.

On utilise un réacteur chimique (*Figure 7*), en l'occurrence un photobioréacteur⁹ puisqu'il s'agit de réactions biologiques et qu'elles nécessitent de la lumière. On a dans le réacteur, dans le milieu de culture, des microalgues (en fait les souches mentionnées plus haut), les nutriments qui nourrissent ces organismes et les produits que l'on veut rechercher.

Le fonctionnement du réacteur fait intervenir : l'absorp-

tion des photons, les réactions biologiques au sein des microalgues dont le métabolisme peut être orienté par les conditions opératoires, les réactions chimiques autour de l'assimilation des nutriments à travers de multiples réactions enzymatiques. Toutes ces réactions ont leurs cinétiques propres et doivent être contrôlées ; le paramètre pH joue un rôle déterminant. Les aspects physiques, notamment l'incorporation de CO₂ dans les milieux de culture, ainsi que la nature des rayonnements, sont également essentiels.

Les systèmes de culture industriels sont extrêmement variés (*Figure 8*). Certains sont des systèmes fermés comme celui qui produit en Israël une microalgue qui donne un pigment nommé astaxanthine, un antioxydant puissant. D'autres sont des systèmes de culture ouverts ou sous serre. Il n'y a pas de pratique générale qui se soit imposée.

2.2. Valorisation énergétique des produits issus des microalgues

2.2.1. Le procédé de production

La culture des algues est faite pour un ou plusieurs produits. On a affaire à une chaîne de procédés schématisée sur la *Figure 9*. Les souches sont choisies en fonction de l'application. Parmi les nutriments, on cite principalement le CO₂, ce qui a conduit à des discours trompeurs sur la gestion des gaz à effet de serre (voir l'*Encart* : « **Valoriser le CO₂ par la production d'algues** »).

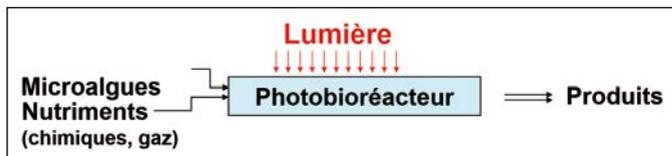


Figure 7

La conversion de nutriments en produits par les microalgues est réalisée à l'aide d'énergie lumineuse dans les photobioréacteurs. Des paramètres cinétiques sont à contrôler : physiques (rayonnement, transfert gaz/liquide), chimique (incorporation cellulaire des nutriments) et biologiques (photosynthèse, métabolisme).



Figure 8

De nombreux dispositifs de production de microalgues permettent aujourd'hui de produire et commercialiser près de 30 000 tonnes de microalgues chaque année.

Source : à droite : Emmanuel Rousseau (Spiruline du Val de Dagne).

VALORISER LE CO₂ PAR LA PRODUCTION D'ALGUES

On sait que les émissions de CO₂ dans l'atmosphère sont beaucoup trop abondantes. Une idée avancée est de consommer ce CO₂ pour produire des algues pour l'aquaculture.

Quelques projets à l'échelle pilote existent, mais il doit être clair que les algues ne sont pas là pour résoudre le problème du CO₂. Elles ne peuvent que le valoriser. Il n'y aurait pas de réalisme à l'idée de capter tout le CO₂ pour produire des algues. Les bilans montrent vite que ce serait complètement impossible à cause de la surface de culture nécessaire.

Après la production du (ou des) produit(s) par les microalgues intervient la récolte qui fournit une biomasse à traiter. De celle-ci, on extrait les produits recherchés et des effluents qu'il faut également traiter avec des recy-

clages possibles. Pour donner un procédé industriel, cette chaîne doit être optimisée. L'optimisation touche beaucoup de paramètres, en particulier celui de la consommation d'énergie, bien entendu, s'il s'agit de mettre en place

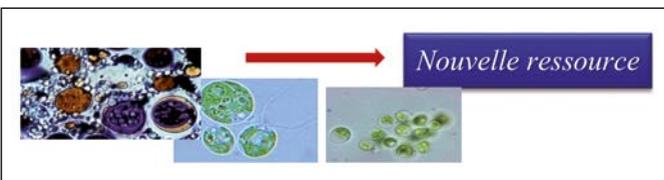


Figure 9

Le cycle de production des microalgues est pensé pour traiter efficacement la nouvelle ressource que présente la biomasse aqueuse.

une filière de production d'énergie à partir d'algues.

2.2.2. Quelle valorisation énergétique ?

Que peut-on produire comme vecteurs énergétiques¹⁰ à partir des algues ?

- L'hydrogène¹¹ : de premières études déjà anciennes se sont intéressées à l'hydrogène puisqu'il a été observé depuis les années 1940 que sous certaines conditions, les algues étaient capables de produire de l'hydrogène.

- Les hydrocarbures : beaucoup de laboratoires se sont orientés vers la production de lipides, de carburants diesel ou d'autres hydrocarbures puisque certaines microalgues les produisent et les relarguent dans le milieu.

- Les polysaccharides pour produire du bioéthanol.

- On peut aussi faire de la fermentation seule ou en mélange avec d'autres déchets organiques pour produire du biométhane.

La culture des microalgues permet un bien meilleur contrôle des nutriments que l'agriculture classique. Elle n'entre donc pas en compétition en ce qui concerne les nutriments. Cependant, il y a compétition sur les surfaces disponibles au sol puisque la future production en masse

10. Voir aussi *Chimie et enjeux énergétiques*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2013.

11. À propos de l'hydrogène, voir aussi le *Chapitre de P. Mauberger* dans cet ouvrage *Chimie et changement climatique*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2016.

ne pourra que faire appel à l'énergie solaire.

2.3. Les clés scientifiques pour optimiser la valorisation énergétique des microalgues

La *Figure 10* liste un certain nombre de processus biologiques à l'œuvre dans les microalgues. Ils pointent vers des verrous scientifiques qu'il faut lever pour développer une application, notamment à la production d'énergie. Les processus biologiques sont dépendants les uns des autres, par le moyen de signalisations biologiques. Celles-ci peuvent être orientées par action sur les métabolismes. On peut ainsi amener le micro-organisme (la microalgue) à stocker les produits synthétisés soit sous forme de corps lipidiques, qui ne sont pas essentiels pour lui mais « mis en réserve » pour son avenir, ou soit sous forme de grains d'amidon. Un des objectifs des laboratoires est de comprendre la manière dont le micro-organisme stocke ces réserves énergétiques sous une forme ou sous une autre, et avec quelle efficacité.

Une des techniques est de concevoir (re-designer) des micro-organismes qui remplissent ces tâches (voir le *Chapitre de M. Fontecave* dans cet ouvrage *Chimie et changement climatique*, EDP Sciences 2016). Les difficultés sont nombreuses, en particulier parce que la présence d'oxygène est inséparable de la photosynthèse, mais aussi parce que de nombreuses enzymes sont perturbées par l'oxygène. Ce domaine évoluera avec les progrès de la biologie de synthèse.

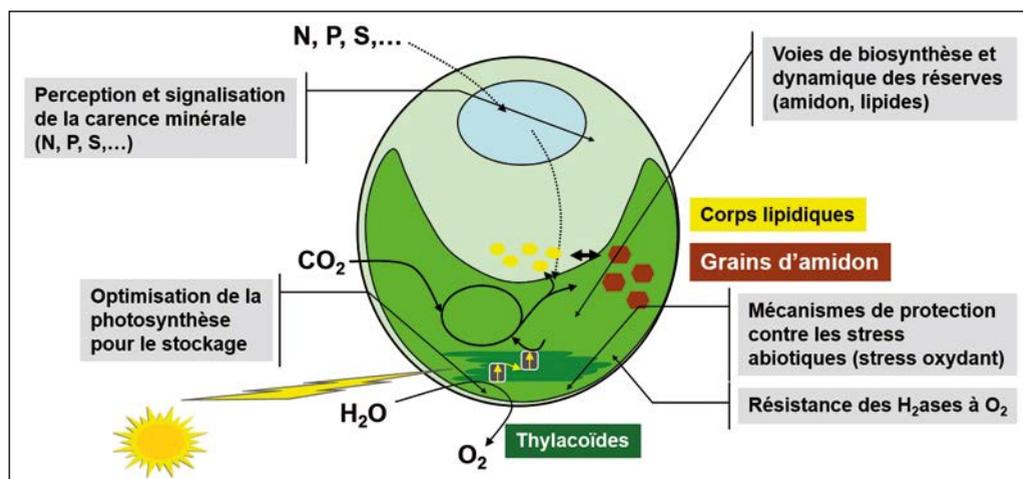


Figure 10

La microalgue est le siège d'un grand nombre de réactions métaboliques qui lui confèrent sa richesse d'exploitation.

Source : G. Peltier.

2.4. Les molécules issues des microalgues pour la valorisation énergétique

2.4.1. Production de lipides

La **Figure 11** donne quelques exemples de lipides produits par les microalgues. Il y a ainsi les lipides neutres (les triacylglycérols, TAG), que l'on peut transformer en carburant diesel ; les lipides constitutifs à la constitution des parois cellulaires – ce sont des phospholipides qui se trouvent dans le chloroplaste. Certaines microalgues produisent directement des hydrocarbures.

La microalgue *Neochloris oleoabundans* est capable d'accumuler des lipides. Dans des conditions normales de croissance, les lipides représentent à peu près 20 % de leur matière (**Figure 12**). Pour orienter le métabolisme vers la production de lipides, on

carence le milieu de culture en nitrates dont l'azote est essentiel pour la synthèse des protéines. Avec moins de nitrate, on fait moins de protéines et donc plus de lipides ; cette stratégie s'applique de façon générale. La fraction lipidique qui a augmenté en pourcentage correspond essentiellement à des TAG. Au laboratoire, on travaille sur l'optimisation des quantités produites. En fait, ce qu'il faut optimiser pour le procédé industriel, c'est à la fois la croissance et le contenu en lipides : c'est le produit des deux qui est important.

2.4.2. Production d'hydrogène

Autre exemple de production d'énergie : la production d'hydrogène. Elle se fait à partir d'une microalgue, *Chlamydomonas reinhardtii*, extrêmement connue dans les laboratoires qui travaillent sur la photosynthèse (**Figure 13**),

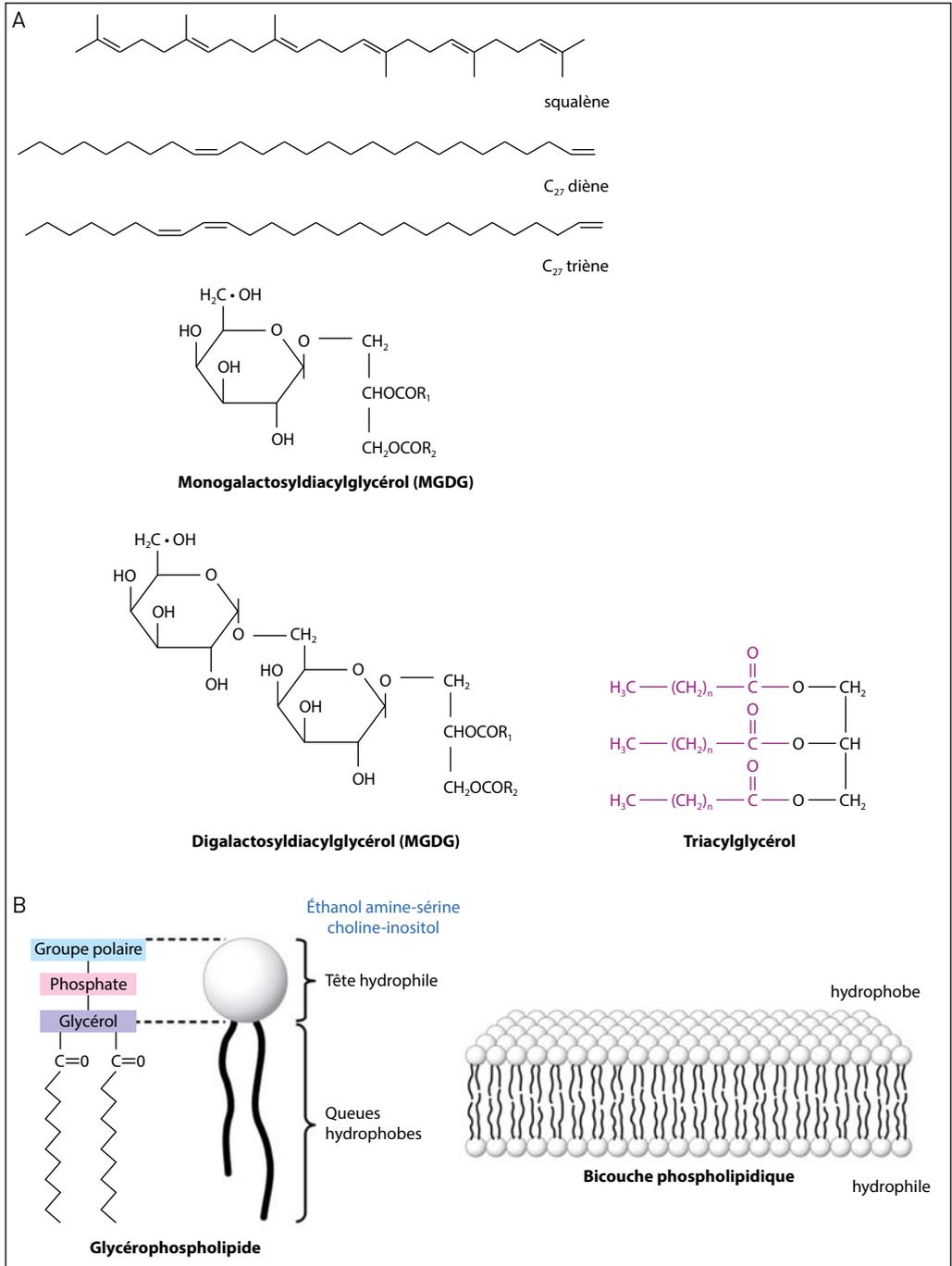


Figure 11

A) Les lipides neutres, comme les triacylglycérils, sont une des classes de molécules produites par les microalgues, lieu de stockage d'énergie ; B) les phospholipides, produits dans le cytoplasme, jouent un rôle primordial dans la formation de parois cellulaires.

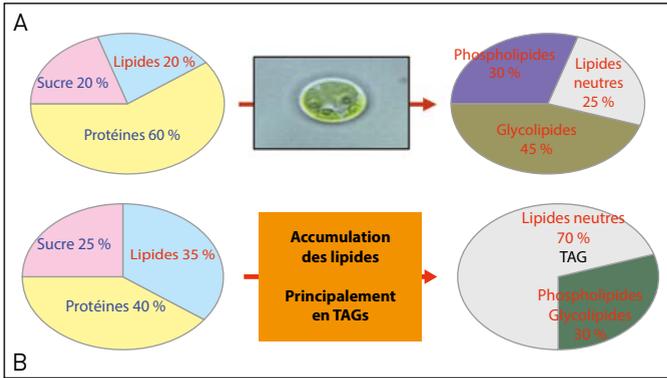


Figure 12

Diagramme représentant la part occupée par les lipides dans les microalgues *Neochloris oleoabundans* en fonction des conditions de culture (standard A ou en carence de nitrate B).



Figure 13

Représentation caractéristique de *Chlamydomonas reinhardtii* avec son double flagelle.

et qui présente deux flagelles. Cette microalgue verte possède une hydrogénase¹², une enzyme capable de transformer les protons en hydrogène. Elle ne le fait pas systématiquement et doit être forcée si l'on veut avoir un procédé industrialisable.

12. Hydrogénase : enzyme catalysant la réaction de conversion de protons H^+ en dihydrogène.

L'hydrogénase est couplée à la photosynthèse. Elle ne transforme les protons qui lui sont envoyés par la chaîne photosynthétique en hydrogène qu'en l'absence d'oxygène (Figure 14). On doit donc trouver des procédés capables de découpler la partie production de biomasse de la partie production d'hydrogène. Soit on modifie les souches qui assurent naturellement

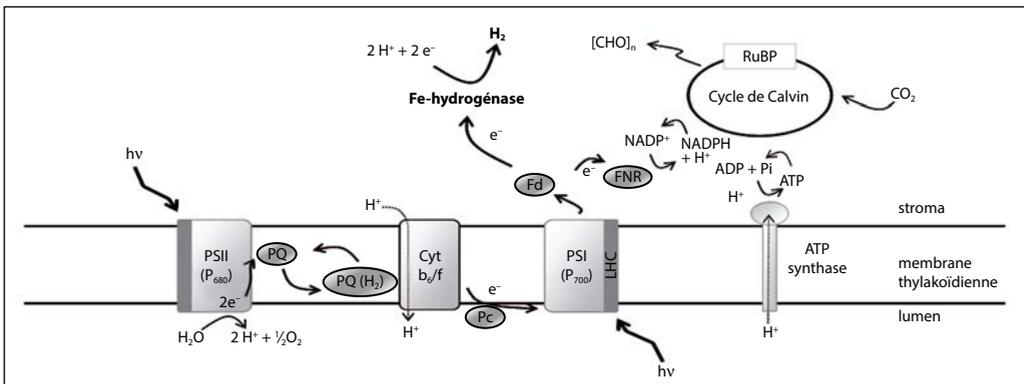


Figure 14

La métabolisation de l'hydrogène en présence de l'enzyme hydrogénase dans les microalgues en fait une des cibles privilégiées pour la production industrielle d'hydrogène.

cette possibilité, soit on ajoute des étapes supplémentaires au procédé : une étape de production de biomasse, une étape de production d'hydrogène. Ces mises au point sont en cours dans les laboratoires.

3 État des lieux et avancées majeures dans la culture de microalgues

3.1. Les microalgues pour la production de biocarburants

À partir de microalgues et de manière industrielle, on produit déjà des huiles végétales pour des applications en compléments alimentaires comme les omega-3 EPA et DHA ; on commence à produire des biocarburants et des « jet fuels » par voie hétérotrophique¹³. Pour ces productions, on utilise des micro-organismes type microalgues ou des levures que l'on nourrit avec du sucre (ou des résidus de mélasse) ou avec des polysaccharides. C'est ce que fait

13. Hétérotrophique : activité de micro-organismes hétérotrophes, lesquels sont incapables de synthétiser leur propre matière organique et ayant donc recours à des sources externes de matière organique.

l'entreprise « Roquette » dans le Nord de la France.

Avec les microalgues ou les micro-organismes de type levuriens, on fait du biodiesel (chimiquement des lipides), mais cette production n'est pas encore complètement industrialisée. Il y a tout de même un vol entre Toulouse et Paris qui utilise toutes les semaines une partie du jet fuel produit à partir de levures (le farnesane, d'Amyris-Total). C'est déjà là une voie industrielle : la rentabilité économique est encore assez éloignée mais les procédés techniques sont maîtrisés.

Au niveau de la recherche et développement, on a une synthèse de biodiesel à partir de micro-organismes photosynthétiques. Pour l'hydrogène, les délais d'application sont plus éloignés parce que les mécanismes biologiques sont beaucoup plus compliqués (**Figure 15**) : il faudra encore au moins vingt années de recherche.

3.2. Valorisation totale des microalgues et systèmes innovants

Associés à la production d'énergie, se développent des travaux sur la valorisation entière de ces micro-organismes. Comme nous avons pu le voir pour les productions de lipides, on est à 30-40 % de lipides dans l'algue, ce qui reste 60 à 70 % d'autre chose. On veut valoriser cet « autre chose », non pas pour le bilan énergétique, mais pour le bilan économique de l'utilisation de la matière, et de nombreux travaux voient le jour sur ce thème un peu partout dans le monde.

Figure 15

Le marché des produits issus de microalgues a un futur prometteur grâce aux progrès réalisés sur les nombreux métabolismes qu'elles abritent.

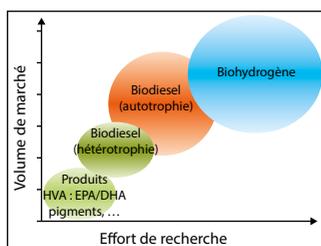




Figure 16

Pour boucler le cycle de production de microalgues, la fabrication de biobitume à partir de résidu d'algues est envisagée (programme de recherche Algoroute financé par la Région des Pays de la Loire réunissant IFSTTAR Nantes, le CEISAM, le GEPEA et la société AlgoSource).

Au niveau du laboratoire, on travaille sur des résidus d'algues dont on avait extrait les lipides pour fabriquer du biobitume. La **Figure 16** montre quelques exemples réalisés avec un procédé de liquéfaction hydrothermale. On obtient une espèce d'huile assez informe mais qui a des propriétés qui ressemblent à celles du bitume : des propriétés visqueuses et thermofusibles¹⁴ qui sont assez proches.

La souche *Porphyridium cruentum* donne des exemples de valorisation des microalgues. Cette souche ne produit pas des lipides mais des exopolysaccharides, qui sont des polysaccharides excrétés par la microalgue, utilisés à l'heure actuelle en cosmétique. Il y a de nombreux produits valorisables avec cette

souche ; l'objectif est de développer une série d'opérations unitaires pour récupérer l'ensemble de ces produits valorisables. C'est tout le problème du génie chimique, de développer des opérations unitaires pouvant travailler en synchronisme.

La **Figure 17** donne un exemple de ce que l'on réalise à l'échelle du laboratoire avec différentes étapes mettant en place des unités de membranes pour séparer les différents produits et essayer de les valoriser de la manière la plus efficace et la plus pertinente possible.

La **Figure 18** donne un exemple d'application d'une autre espèce. Il s'agit de culture urbaine de microalgues, qui pourraient participer à l'agriculture urbaine du futur. Sur la figure est montré un prototype construit au laboratoire, qui simule ce que seraient des photobioréac-

14. Thermofusibles : qualifie une matière qui devient fluide sous l'effet de la chaleur.

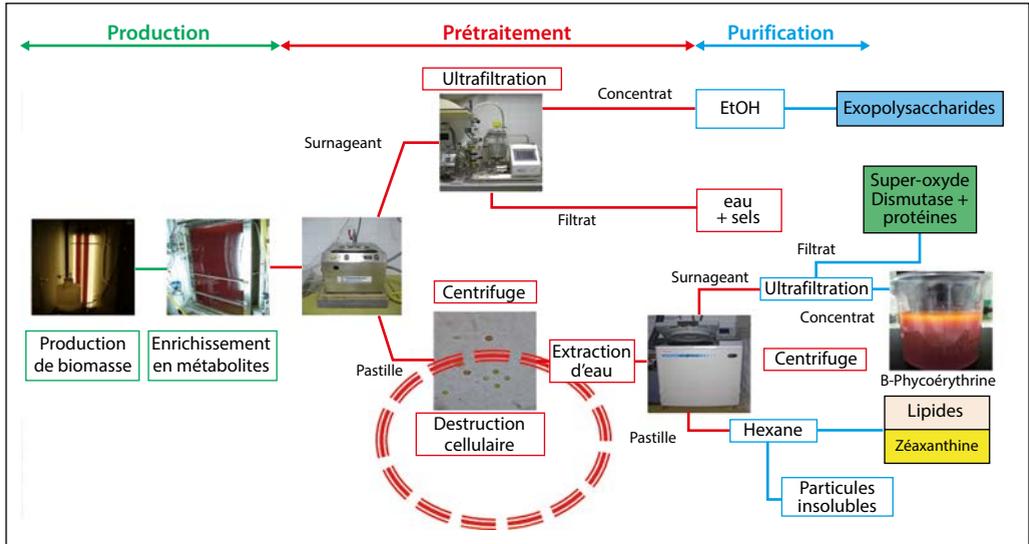


Figure 17

Schéma de procédés fonctionnant à l'échelle du laboratoire pour la valorisation énergétique des microalgues.

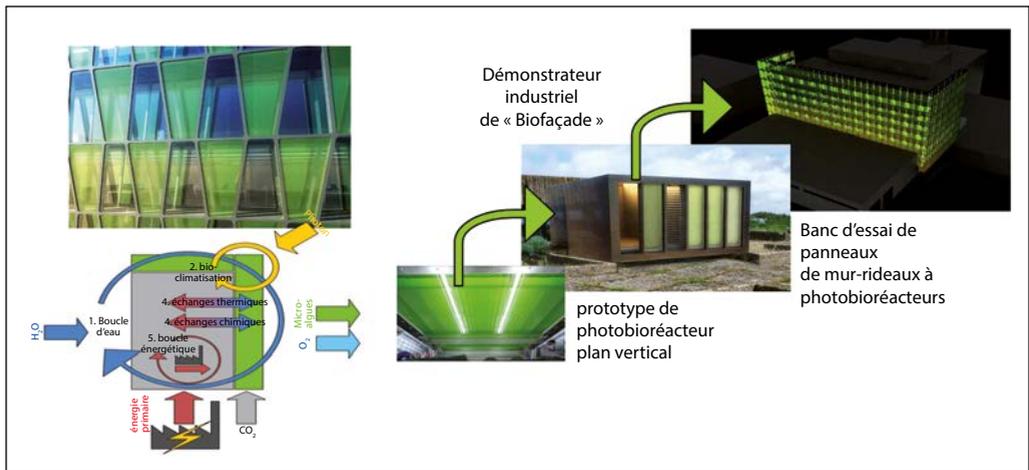


Figure 18

Le projet « Symbio2 » (partenariat : XTU, Séché, AlgoSource, GEPEA, OASIS, Viry, CSTB) : des photobioréacteurs sous forme de panneaux viennent habiller les façades d'immeubles. Les échanges thermiques entre le bâtiment et le panneau de microalgues assurent leur survie.

Source : XTU.

teurs à installer en façade des bâtiments. La thermique du bâtiment peut aider à la culture des algues et inversement en fonction des sai-

sons ; on peut aussi imaginer des symbioses massives notamment à partir du CO₂ ou des eaux résiduelles produites à partir du bâtiment.

Quel avenir pour les microalgues ?

Avec leur nombre gigantesque et leur extrême diversité biologique, les microalgues offrent un éventail impressionnant pour effectuer des synthèses chimiques de produits qui peuvent intéresser l'humanité. Les réactions chimiques qu'elles font naturellement utilisent l'énergie du Soleil par la photosynthèse, considérablement plus économe en énergie que les procédés catalytiques habituels à nos industries.

Pour exploiter ce potentiel, les laboratoires de biologie/chimie doivent comprendre en détail le fonctionnement de ces organismes pour éventuellement leur apporter des modifications en interaction avec les spécialistes du génie chimique pour la mise au point des réacteurs chimiques qui permettent de les exploiter et d'extraire les produits recherchés.

Aujourd'hui, plusieurs productions industrielles utilisant les microalgues sont déjà rentables, des compléments alimentaires aux polysaccharides. Les travaux d'industrialisation progressent, et d'autres produits vont venir, en particulier pour alléger les difficultés prévues dans la production d'énergie à partir des combustibles fossiles.

L'hydrogène, vecteur de la transition énergétique

Diplômé de l'École polytechnique et de l'IFP School, Pascal Mauberger évolue dans le secteur de l'industrie des hautes technologies depuis maintenant trente ans. Il est le président directeur général de la société anonyme française McPhy Energy¹, qui est spécialisée dans les équipements et systèmes de production, stockage et mise en œuvre d'hydrogène pour les applications énergétiques. Il est également président de l'Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustibles (AFHYAC²).

1 L'hydrogène, l'énergie de demain ?

transport et dans la production de l'énergie.

1.1. L'état des lieux

Le changement climatique nous confronte à deux défis majeurs. Le premier est de pouvoir **répondre à une consommation énergétique mondiale en hausse** (Figure 1), tirée par une population mondiale en constante augmentation et qui voit son taux d'accès au confort moderne augmenter. Le deuxième est de **limiter l'impact de l'activité humaine sur le climat** pour atteindre l'objectif de limiter le réchauffement à 2 °C à la fin de ce siècle. Pour cela, il faut limiter massivement les émissions de gaz à effet de serre dans l'industrie, dans le

1.2. Les avantages de l'hydrogène

Sans bien sûr résoudre tous les problèmes, l'hydrogène peut contribuer à leurs solutions. L'hydrogène n'est pas une nouveauté, il est massivement produit et utilisé depuis plus d'un siècle dans l'industrie (à hauteur de 60 millions de tonnes par an), essentiellement dans la pétrochimie et la synthèse d'engrais, mais également dans la métallurgie, la chimie de spécialité, la production du verre, l'agroalimentaire et la production des semi-conducteurs³.

3. Semi-conducteur : matériau dont la conductivité électrique est intermédiaire entre celle des métaux et des isolants.

1. www.mcphy.com/fr/

2. www.afhyac.org

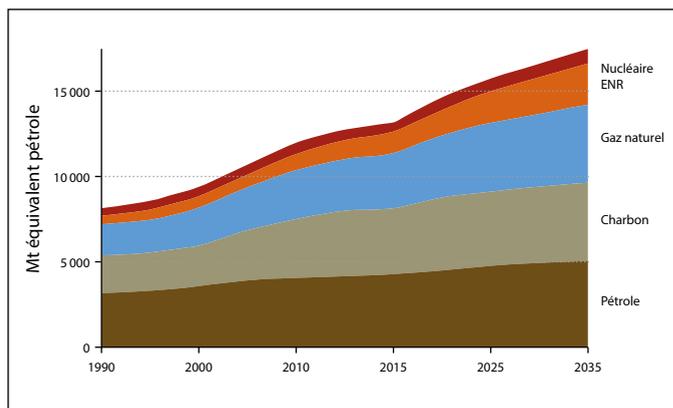


Figure 1

Tendance à la hausse de la consommation mondiale d'énergie pour les vingt années à venir (en millions de tonnes équivalent pétrole). L'utilisation du gaz et du charbon augmente, alors que l'objectif est de les réduire.

Cette ressource énergétique est extrêmement abondante, pratiquement illimitée sur Terre. L'hydrogène provient principalement du vaporé-



Figure 2

L'hydrogène H_2 peut être extrait de la molécule d'eau H_2O par électrolyse.

formage⁴ de gaz naturel (méthane) mais il est également extrait de la molécule d'eau (H_2O) par électrolyse, c'est cette caractéristique qui lui donne tout son intérêt pour les applications énergétiques (Figure 2). La technologie de l'électrolyse est parfaitement maîtrisée par les industriels depuis longtemps grâce à la production de chlore par ce procédé.

L'avantage de l'hydrogène est sa très forte capacité énergétique (33 kWh/kg en PCI⁵). Il y a trois fois plus d'énergie dans un kilo d'hydrogène que dans un kilo de méthane ou d'essence. L'hydrogène est l'élément le plus léger que l'on connaisse, il faut donc le densifier. La société McPhy Energy a développé un procédé, le *stockage solide de l'hydrogène sur hydrure de manière réversible*, qui permet d'obtenir des densités volumiques très intéressantes.

2 L'hydrogène, pour réduire le gaspillage énergétique

2.1. Valoriser les énergies renouvelables grâce à l'hydrogène

La transition énergétique en cours nous confronte à un

4. Vaporéformage : procédé de production de gaz de synthèse. Pour l'hydrogène, cela consiste à faire réagir du méthane avec de la vapeur d'eau pour former CO_2 et H_2 .

5. PCI : Pouvoir Calorifique Inférieur. Cette valeur nous renseigne sur la quantité d'énergie émise lors de la combustion d'une mole de produit.

changement majeur dans la production et la distribution d'énergie. Avec les « énergies renouvelables », elle nous conduit en effet à insérer des éléments de production d'électricité intermittents et peu prévisibles (Figure 3). On est en train de passer d'un modèle dans lequel on produisait l'électricité à la demande, de manière centralisée, à un système dans lequel on va avoir une production diffuse sur tout le territoire et non calquée sur une consommation. Cela entraîne des problèmes de stabilité des réseaux et de stockage d'énergie.

Les énergies renouvelables produisent de l'électricité même quand il n'y a pas de consommateur. Comme elles ont une priorité d'accès au réseau, et comme l'énergie qu'elles produisent est payée même si elle n'est pas consommée, les acteurs de marché peuvent avoir intérêt à pratiquer, sur certaines périodes, des « prix négatifs » de l'électricité (Figure 4). Cela

illustre le fait que le système ne fonctionne pas précisément comme on le voudrait et qu'il conduit à un gaspillage de la valeur sur nos réseaux énergétiques.

En face de l'intermittence de la production d'électricité par les énergies renouvelables, et au lieu de gaspiller les surplus de production, on peut mettre la possibilité de synthèse d'hydrogène à partir d'électricité et d'eau. Cela ouvre la capacité d'utiliser l'électricité lorsqu'elle est trop abondante sur le réseau électrique, de la transformer en hydrogène, et d'ouvrir ainsi à cette électricité, principalement éolienne ou photovoltaïque, de nouveaux usages :

- le premier est de la valoriser en utilisant l'hydrogène produit dans l'industrie – avec des avantages de coût et de rendement (Figure 5) ;
- le deuxième est d'utiliser cet hydrogène pour alimenter des véhicules électriques. L'électricité est générée par

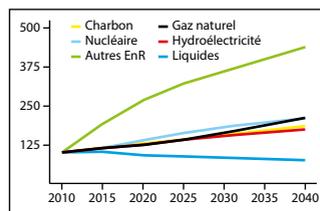


Figure 3

Croissance de la production électrique mondiale. On prévoit une augmentation importante de la production d'électricité par les énergies renouvelables (ENR) pour les années à venir – une production dont le débit n'est pas facilement contrôlable.

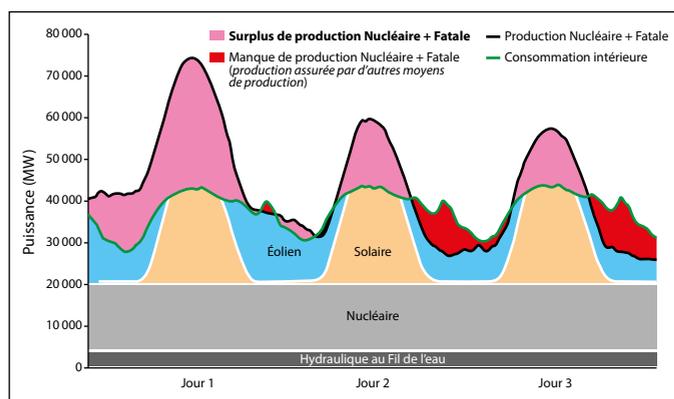


Figure 4

La progression des énergies renouvelables dans le mix énergétique dépend du lissage et du stockage de la production. Elle peut nécessiter le recours à des « prix négatifs ».

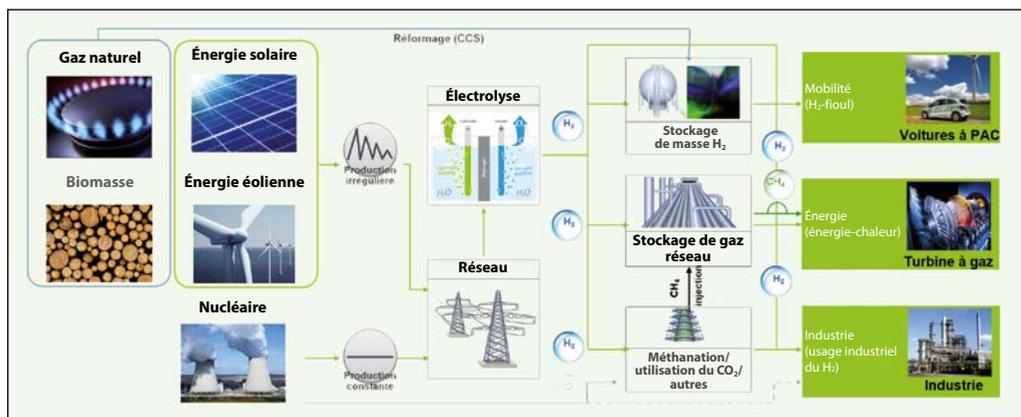


Figure 5

Un changement de paradigme dans le modèle énergétique. On voit apparaître les chemins que peut emprunter l'électricité générée en excès afin d'être valorisée sous d'autres formes d'énergie.

le vecteur hydrogène directement dans le véhicule, ce qui est une voie de motorisation sans émission de carbone. L'intérêt du vecteur hydrogène est que l'on densifie la quantité d'énergie emportée dans le véhicule par rapport aux batteries, qui sont trop lourdes est beaucoup moins efficaces ;

- le troisième usage est d'injecter cet hydrogène dans les réseaux de gaz de ville, le « power to gas » (voir plus loin), qui est aussi une façon de stocker, sous forme de gaz, de l'énergie éolienne ou photovoltaïque.

2.2. Stocker l'énergie sur du long terme

S'il s'agit de stocker de l'énergie électrique sur des courtes durées, les batteries font très bien le travail ; elles permettent de stocker des quantités d'énergie relativement modestes pendant quelques heures. Si on veut stocker sur plusieurs jours voire plusieurs semaines, les batteries atteignent leurs limites pour des problèmes d'autodécharge, de quantité, de volume et de masse utili-

sée. La solution aujourd'hui ce sont les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage⁶ (STEP) (Voir *le Chapitre de Y. Bréchet* dans cet ouvrage *Chimie et changement climatique*, EDP Sciences, 2016). En France, on pourrait avoir, en 2050, 70 Terawattheures (TWh) d'énergie renouvelable à stocker. Sur les plus grosses STEP, on est largement en-deçà de cette valeur ; même si elles ont de très bons rendements, elles ne conviennent pas à l'ordre de grandeur du besoin.

L'hydrogène vient se positionner en complément : on saura stocker les nécessaires quantités importantes d'énergie sous cette forme et les conserver sur une durée longue (*Figure 6*).

2.3. Le « power to gas »

La possibilité de valoriser les surplus d'énergie par les réseaux de gaz a été démontrée

6. Stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) : installations où de l'eau est pompée dans un réservoir haut, puis envoyée sur une turbine pour régénérer l'électricité, sur le même principe qu'un barrage hydroélectrique.

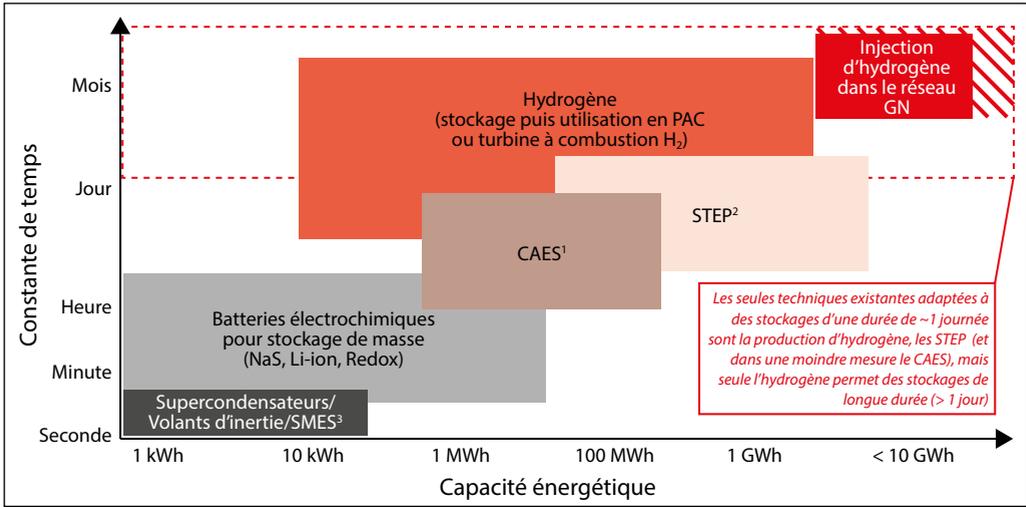


Figure 6

Capacité énergétique et constante de temps des différentes solutions de stockage de l'électricité. Des compromis sont à faire entre quantité d'énergie stockée et durée limite de stockage des différents moyens existants. L'hydrogène est la technologie la plus adaptée pour le stockage massif de longue durée ; à la différence des STEP, il ne peut pas stocker de très grandes quantités d'énergie, mais il permet une durée de stockage beaucoup plus longue.

1) CAES (« Compressed Air Energy Storage ») : stockage d'énergie par air comprimé.

2) STEP : Station de Transfert d'Énergie par Pompage.

3) SME (« Superconduction magnetic energy storage ») = stockage d'énergie par supraconducteurs.

4) La constante de temps d'un stockage est égale au ratio « capacité énergétique/puissance maximale » du stockage. Elle caractérise le temps mis par un stockage pour se vider (ou se charger) entièrement lors d'un fonctionnement à puissance maximale. Son unité est une unité de temps (le plus souvent, l'heure).

par le biais de « Falcon Agen », le premier projet allemand significatif au niveau industriel. Il consiste à prendre de l'énergie éolienne, et à la transformer en hydrogène pour l'injecter dans les réseaux de gaz naturel (Figure 7). Ces réseaux peuvent contenir jusqu'à 6 % d'hydrogène. Il y a quelques années, les usines à gaz construites en Seine-Saint-Denis (autour de l'actuel stade de France) produisaient du gaz issu du procédé Fischer Tropsch⁷ conte-

nant 50 % d'hydrogène. Le gaz de ville comportait ce même pourcentage en hydrogène. On l'a petit à petit remplacé par le méthane qui provenait de gisements dans le sol.

En utilisant ce potentiel de 6 % d'ajout en hydrogène, on pourrait valoriser la totalité de l'énergie éolienne mondiale. En France, on a un paradoxe : on possède des réseaux de gaz qui peuvent transporter aux alentours de 500 TWh par an, mais ils ne sont pas utilisés au maximum de leur capacité. Ceci parce que l'amélioration de l'efficacité énergétique des chauffages des bâtiments fait que la demande en gaz

7. Le procédé Fischer-Tropsch permet de convertir le monoxyde de carbone et le dihydrogène en hydrocarbure, en utilisant un catalyseur : $(2n + 1)H_2 + nCO \rightarrow C_nH_{2n+2} + nH_2O$.



Figure 7

Valoriser intelligemment les surplus d'énergie électrique par le « Power to Gas ». Cette technique consiste à produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau grâce au surplus d'électricité générée par les énergies renouvelables, et de l'injecter dans le réseau de gaz naturel.

Source : courtoisie AFHYPAC, Mcphy.

est de moins en moins forte. Cette tendance est bénéfique en soi mais conduit à la sous-charge de nos réseaux de transport et de distribution de gaz, alors qu'à l'inverse, on a des réseaux électriques de plus en plus saturés par des afflux massifs et intermittents d'électricité.

On se trouve donc confronté au paradoxe suivant : surinvestir dans des boucles locales et les réseaux électriques alors qu'on a une

capacité de transport excédentaire sur le réseau de gaz. Si on ouvre et on optimise ces deux réseaux de manière intelligente et cohérente, à travers le « power to gaz », on peut tirer partie de cette situation. En France, on a de premiers projets de démonstration, dont un dans la région de Dunkerque, porté par Engie-CRIGEN⁸ (ancien-

8. Centre de Recherche et Innovation gaz et Énergies Nouvelles.

nement GDF Suez). Il consiste à prendre l'électricité éolienne de la région, l'utiliser pour produire de l'hydrogène et injecter celui-ci dans les réseaux de gaz naturel d'un éco-quartier de 200 maisons situé à Capelle-la-Grande. Le gaz naturel sera enrichi dans un premier temps à 6 %, et dans deuxième temps à 20 %, d'hydrogène. Pour rassurer le consommateur, tous les appareils fonctionnant au gaz – comme les gazinières ou les chaudières – sont testés et homologués avec un gaz qui peut contenir jusqu'à 23 % d'hydrogène ! Un projet de démonstration de grande envergure (1 MW) vient d'être lancé par GRT Gaz et ses partenaires (dont McPhy pour l'électrolyse) à Fos-sur-mer.

3 La mobilité électrique hydrogène

3.1. De la batterie à l'hydrogène

On sait que le transport est un contributeur majoritaire dans l'émission de gaz à effet de serre et qu'il faut le « décarboner »⁹ (Figure 8).

Pour y arriver, la traction ou la propulsion électrique des véhicules est l'un des meilleurs moyens bien que, naturellement, le moteur thermique consommant 2 litres de carburant pour 200 kilomètres aura aussi son rôle à jouer. Le problème du véhicule électrique est la manière de générer ou de

stocker l'électricité qui alimente le véhicule. La première technique est d'utiliser des batteries, cela fonctionne très bien – on peut le vérifier sur les véhicules comme Autolib et autres véhicules commercialisés – mais ce ne sont que des véhicules ayant 100-150 kilomètres d'autonomie et des temps de notoirement trop longs. Ils peuvent convenir pour des transports urbains ou périurbains, mais pour un Paris-Grenoble avec une Zoé (voiture électrique de la marque Renault), c'est plus limité : il faut s'arrêter cinq à six fois pendant plusieurs heures, ce qui est contraignant...

En revanche, avec les véhicules électriques à hydrogène, on pourra recharger le véhicule en hydrogène. Grâce à une station comme celle d'Ivry-sur-Seine (station installée par l'entreprise

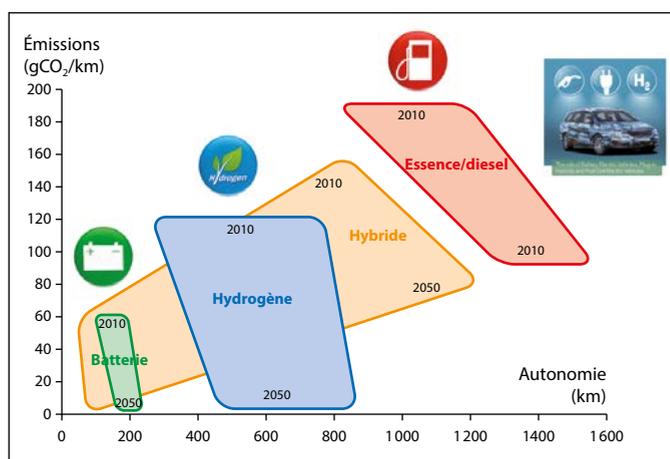


Figure 8

9. Voir *Chimie et transports, vers des transports décarbonés*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2014.

La réduction de 95 % des émissions de CO₂ du transport routier ne peut pas se faire sans l'utilisation des véhicules propres. Or encore aujourd'hui, 99 % des véhicules fonctionnent à l'essence : la marge de progression est énorme.

McPhy pour le compte de la mairie de Paris à l'occasion de la COP 21) par exemple, on peut aller jusqu'à Lyon où se trouve une autre station sur le port Edouard Herriot exploitée par GNvert (filiale de Engie) et continuer ainsi jusqu'à Marseille. L'hydrogène chargé dans le véhicule vous permet d'obtenir une autonomie de 500 à 600 kilomètres entre deux pleins qui se font en quatre à cinq minutes (Figure 9). L'hydrogène apporte à la mobilité électrique des valeurs d'usages semblables à celles des véhicules thermiques dans le cadre d'une mobilité complètement propre et sans émission de carbone.

La mobilité électrique par batterie ou la mobilité électrique à hydrogène sont bien deux types de mobilité totalement écologiques et complémentaires.



Figure 9

Les véhicules à hydrogène sont beaucoup moins contraignants que les véhicules à batterie au niveau du temps de rechargement. De plus, ils présentent un rapport autonomie/émission de CO_2 beaucoup plus intéressant que les véhicules à essence car leur autonomie est suffisante pour de longs trajets.

Source : Wikipédia, licence CC-BY-SA-3.0, Kirill Borisenko (voiture électrique), Dynamicwork (hydrogène).

3.2. Les constructeurs automobiles entrent dans la danse

Les véhicules fonctionnant à l'hydrogène commencent à apparaître car les piles à combustible sont maintenant capables de servir un véhicule. Elles atteignent des durées de vie compatibles avec un fonctionnement de 300 000 kilomètres sans panne ni besoin de remplacement ; par ailleurs, leur coût est devenu intéressant car l'utilisation du platine dans les membranes PEM¹⁰ a été fortement réduite. L'industrie automobile commence donc à prendre ce type de technologie en compte. Avec les volumes et le savoir-faire de l'industrie automobile, on peut s'attendre à une réduction très forte du prix des piles à combustible.

Un constructeur en pointe sur ce sujet est Honda avec sa Civic Clarity, suivi de Hyundai, qui a commercialisé depuis décembre 2013 son YX35 aux États-Unis puis en Europe, comme à Paris par exemple (Figures 10 et 11). La Toyota Mirai (Mirai signifie « avenir » en japonais), annoncée en décembre 2014, est une voiture de milieu haute gamme, déjà commercialisée aux États-Unis et qui arrivera en Europe en 2016. Le pari de Toyota est de démontrer sa maîtrise des tractions électriques et de la façon d'hybrider les techno-

10. Membrane PEM (« Proton Exchange Membrane ») : membrane échangeuse de protons qui consiste en une membrane perméable aux ions H^+ de l'eau pour permettre l'électrolyse de celle-ci, mais imperméable aux gaz tel que O_2 ou H_2 pour éviter la réversibilité de la réaction.

logies. Ils ont été à l'origine de l'hybridation électrique-thermique et veulent utiliser ce savoir-faire pour donner aux clients les véhicules qu'ils veulent, à savoir : propres et avec une autonomie suffisante.

La complémentarité entre les véhicules à batterie pour les courtes distances et les véhicules à hydrogène pour les trajets interurbains commence à se traduire par l'offre de modèles commercialisés.

3.3. La mobilité électrique hydrogène en France à l'échelle des particuliers

En France, les plans tournent autour d'un véhicule produit par Renault, la Kangoo ZE, à

batteries avec un prolongateur d'autonomie à hydrogène. Il s'agit de véhicules de fret urbain, véhicules utilitaires confrontés au besoin d'aller dans les centres-villes où s'exerce une forte pression citoyenne, des collectivités et des maires de ne plus voir de véhicules polluants dans les centres-villes. Cette contrainte oriente vers des véhicules propres... donc électriques (Figure 12).

Grâce aux aides financières de l'État et les économies de carburant, l'achat d'un véhicule à prolongateur à hydrogène n'entraîne un surcoût sur la vie complète du véhicule que de 5 000 euros maximum.

Le directeur de DHL Rhône-Alpes, après livraison de sa



Figure 10

Les véhicules du futur sont déjà là.

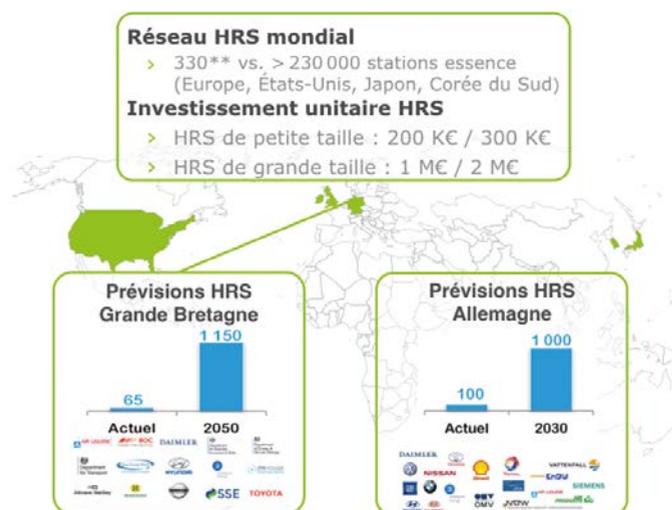


Figure 11

La Mobilité hydrogène prend son essor au niveau mondial (pionniers : Allemagne, Grande-Bretagne, Californie, Japon, Corée du Sud). Le développement du réseau de stations HRS (« Hydrogen Refueling Station ») déterminera sa croissance. Les prévisions de développement sont positives pour les années à venir. L'HRS jouera un rôle majeur dans l'expansion de la mobilité électrique hydrogène.

Source : H2mobility.org.

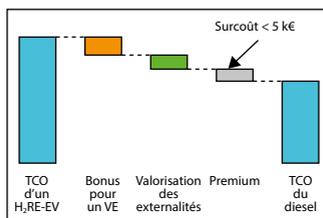


Figure 12

Les véhicules à prolongateur d'autonomie H_2 ont un coût total de possession (« Total Cost of Ownership », TCO) très proche de celui des véhicules diesel (surcoût < 5 k€).

VE = véhicule électrique ;
 H_2RE-EV = véhicule électrique à prolongateur d'autonomie H_2

Kangoo à hydrogène au mois de mars 2015, a tenu un discours remarqué sur le fait que leur métier est de livrer des paquets en centre-ville, qu'ils veulent et doivent le faire avec des véhicules propres. Ils ont acheté des Kangoo ZE à batterie ; cependant, l'autonomie de ces véhicules n'est que de 100 kilomètres alors que leur besoin est de 150 à 300 kilomètres d'autonomie. Pour faire une journée de travail, il leur faudrait donc davantage de véhicules. Avec le prolongateur à hydrogène qui double l'autonomie, celle-ci atteint 250-300 kilomètres, si bien que la voiture réalise sa journée de travail et revient au dépôt, où elle est rechargée en trois minutes en hydrogène et branchée sur une prise de courant. Le lendemain matin, elle repart pour sa journée (Figure 13).

Cette stratégie a été mise en avant par un consortium d'industriels, piloté par l'AFHY-PAC, motivé par les besoins du fret urbain d'avoir des véhicules urbains propres et le constat que l'hybridation batterie/prolongateur d'auto-

nomie conduit à une réduction drastique du coût d'usage. On approche ainsi du coût d'un véhicule diesel. Les arguments sont développés sur le site de l'AFHY-PAC : www.afhypac.org.

Un plan de déploiement de véhicules à hydrogène a été proposé pour la France. Il n'implique que des infrastructures peu coûteuses et flexibles (Figure 14). Les stations de rechargement coûteront quelques centaines de milliers d'euros et seront capables d'alimenter une vingtaine ou une quarantaine de véhicules. La stratégie envisagée est de faire évoluer ces infrastructures avec la demande plutôt que de positionner d'emblée de très grosses stations de rechargement (stratégie allemande).

De telles infrastructures pourront trouver leur rentabilité rapidement sur le marché du fret urbain et de la livraison en centre-ville. C'est ce qui se met en place par exemple à Ivry sur Seine (livraisons en novembre 2015 pendant la conférence sur le climat COP

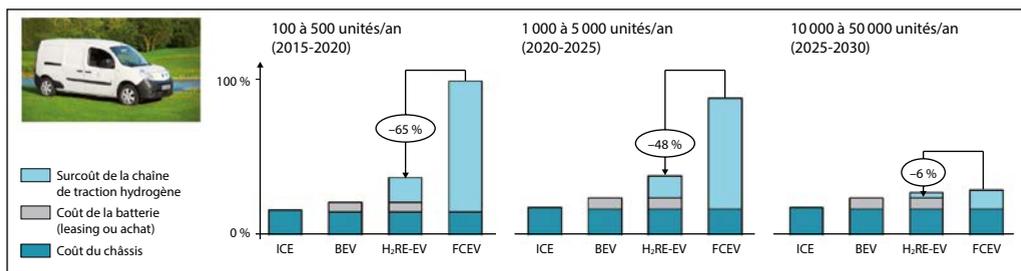


Figure 13

À haut volume de production, la différence de coût de production entre la technologie électrique plus prolongateur d'autonomie et pile à combustibles deviendra minime lorsqu'elle sera au point. Cette dernière sera alors plus avantageuse du fait de sa meilleure autonomie... en 2030 !

BEV : Véhicule électrique à batterie ; H_2RE-EV : véhicule électrique à prolongateur d'autonomie H_2 ; FCEV : véhicule à pile à hydrogène.

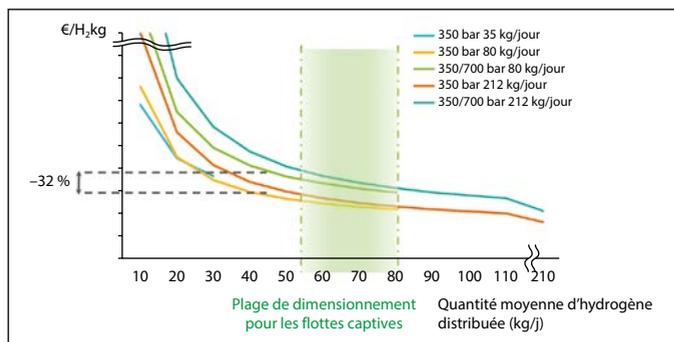


Figure 14

Ce graphe montre qu'il est pertinent d'adapter la taille des stations au nombre de consommateurs pour éviter de surfacturer le kg d'hydrogène et de permettre l'accès à cette énergie pour tous car les stations sont plus rentables.

21), à Sarreguemines au voisinage de la frontière avec l'Allemagne et à Valence, alors que des installations existent déjà à Lyon et à Grenoble : c'est tout un corridor qui se met en place (Figure 15).

La perspective est de voir 800 000 véhicules (Figure 16A) à hydrogène à l'horizon 2030, 90 000 tonnes d'hydrogène produit (Figure 16B), 600 stations de recharge d'hydrogène sur le territoire (Figure 16C),

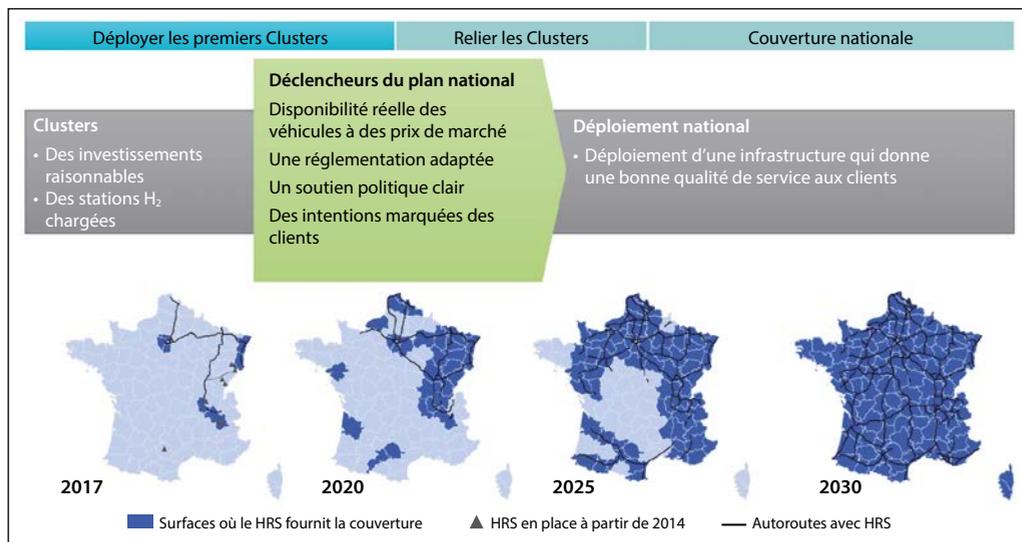


Figure 15

Le développement des stations à hydrogène (HRS, « Hydrogen Refueling Station ») en France d'ici 2030 devrait permettre une utilisation sans contrainte des véhicules à hydrogène.

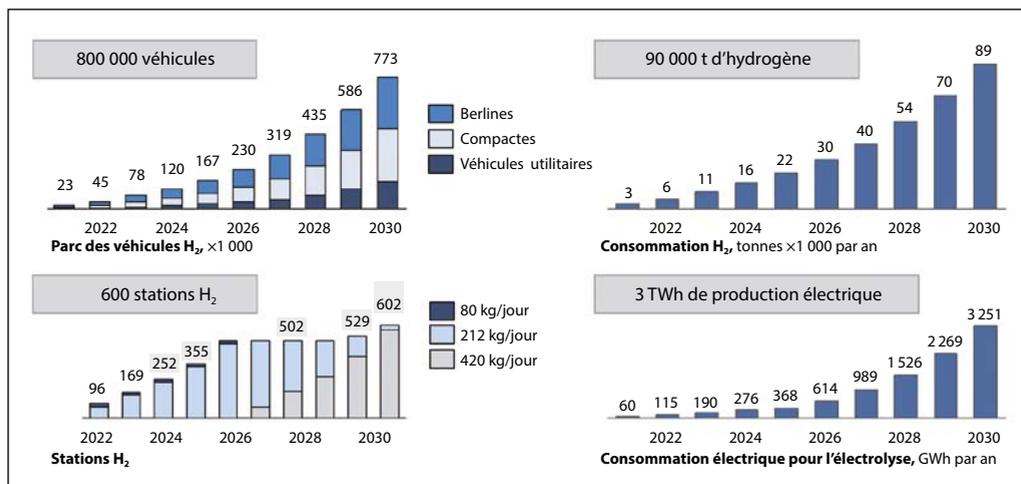


Figure 16

La mobilité hydrogène pourrait connaître une croissance décisive de 2016 à 2030.

et donc 3 TWh de production électrique (Figure 16D) utilisés dans le transport électrique à hydrogène.

3.4. La mobilité électrique hydrogène en Europe à l'échelle des particuliers

À côté de la France, plusieurs pays en Europe adoptent des stratégies de développement de véhicules à hydrogène, comme l'Allemagne, le Royaume-Uni et la Scandinavie. Petit à petit tous ces pays se couvriront ainsi de points de rechargement s'intégrant dans les corridors européens et permettant un large déploiement. Les plans de la commission de Bruxelles, direction des transports, envisagent des corridors d'Oslo à Naples (Figure 17) avec une station-service hydrogène tous les 90 à 100 kilomètres.

3.5. La mobilité électrique hydrogène à grande échelle

On vient de voir l'utilisation de l'hydrogène pour la mobilité

domestique : le fret urbain par des véhicules utilitaires légers qui vont livrer des paquets en centre-ville, la « Mirai », les véhicules domestiques quand les infrastructures seront là...

Mais on voit de plus en plus de grosses villes se positionner sur le transport par bus à hydrogène. Les bus ont besoin de puissances importantes, et la capacité des batteries n'est pas suffisante pour assurer leur journée de travail. Avec l'hydrogène et ses réservoirs placés sur le toit du bus, on réalise un véhicule totalement non polluant et non carboné ; c'est la possibilité d'avoir une flotte urbaine de bus tout à fait propre (Figure 18).

Dans un autre ordre d'idée, on peut parler des grands « centres logistiques » : des sites de milliers de mètres carrés où l'on n'arrête pas de déplacer des paquets pour aller les livrer dans les Wal-Mart, Coca-cola, Amazon, etc. Des dizaines, voire des centaines de charriots élévateurs fonctionnant initialement avec des batteries passent progressi-

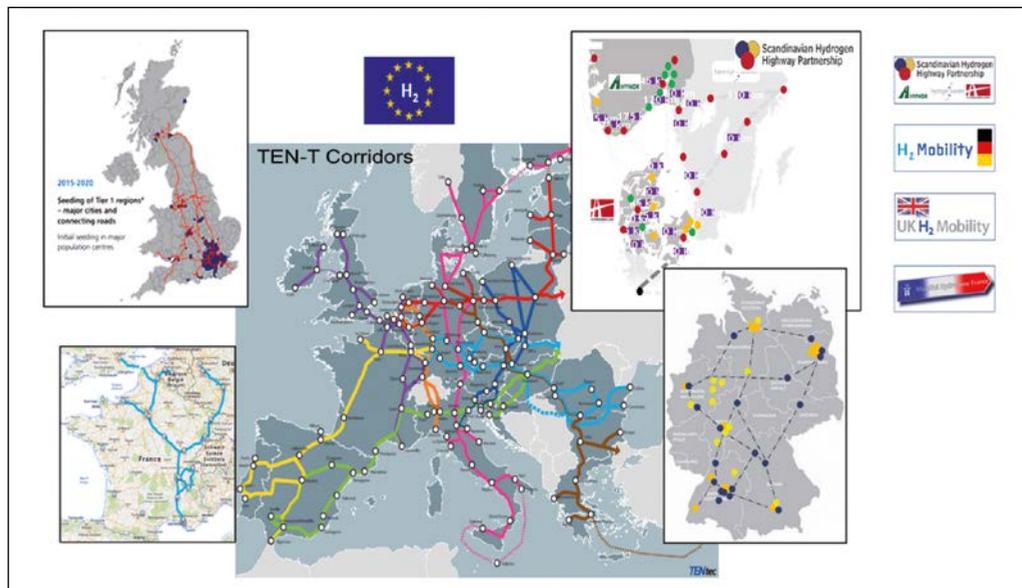


Figure 17

En rassemblant les initiatives existantes, on amorce le déploiement d'un réseau HYDROGENE européen.

Source : AFHYPAC et consortium mobilité hydrogène France.



Figure 18

L'hydrogène pourrait être amené à servir comme carburant pour les véhicules de transport ou de manutention, et pas seulement pour les véhicules domestiques ou utilitaires.

Sources : charriot élévateur : Air Liquide ; bus bleu : AFHYPAC ; bus vert : wikipédia licence CC-BY-SA-3.0, Dynamicwork.

vement à l'hydrogène (8 000 aujourd'hui). Ce qui guide ces évolutions, ce n'est pas tant la problématique du développement durable que la rentabilité : ces centres logistiques

sont de 20 à 25 % moins coûteux avec l'hydrogène, simplement parce que l'autonomie et la puissance sont meilleures, et le rechargement de ces charriots est beaucoup plus rapide.

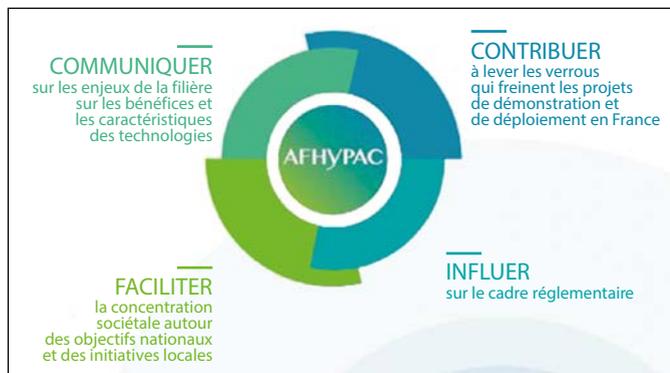
L'hydrogène pour le développement durable

L'association AFHY PAC, ainsi que les listes de ses membres – grands groupes industriels ou PME innovantes – sont présentées sur la **Figure 19** et le **Tableau**. Beaucoup de technologies françaises peuvent se positionner sur les nouveaux marchés de l'hydrogène. La « transition énergétique pour une croissance verte » est en fait une opportunité de croissance industrielle génératrice d'emploi. Ces technologies sont intégrées dans des produits commerciaux. L'Hydrogène énergie, c'est aujourd'hui !

La recherche reste évidemment à soutenir dans ces domaines : il faut continuer à y investir, à inventer pour produire de nouveaux produits et améliorer ceux existants. Aujourd'hui, les collectivités territoriales s'emparent de ces sujets car c'est pour elles la possibilité de maîtriser leur besoin en énergie en respectant les règles du développement durable.

Figure 19

Les missions de l'AFHY PAC, ses engagements pour le futur.



Tableau

Les membres de l'AFHYPAC représentent tous les secteurs ayant un pouvoir de décision ou étant dépendants du développement de la mobilité hydrogène.

Collège « Grands groupes industriels, institutions financières et ETI »	
AIR LIQUIDE	ENGIE
AREVA Stockage d'énergie	GRTgaz
AXA	MICHELIN
Caisse des Dépôts	STAUBLI
Compagnie Nationale du Rhône	TIGF
EDF-EIFER	UNIPER France
Collège « Industriels utilisateurs et clients finaux »	
Dassault Aviation	
Collège « Organismes de recherche, laboratoires, universités, écoles et centres techniques »	
CEA	Fédération FCLAB
CNRS	Institut Carnot Mines
INERIS	CNRS GDR HysPAC
Collège « PME-PMI »	
Actys-BEE	Hydrogenics
AD-VENTA	HySiLabs
Alca Torda Applications	ITM Power
ATAWEY	MaHyTec
AREVA H2Gen	McPhy Energy
AvenHyr Conseil	NEXEYA
Bulane	PaxiTech
ENEA Consulting	Powidian
Enercat	Pragma Industries
Ergosup	PV Puech Long
Green Access	Raigi
GreenGT Technologies	Seiya Consulting
HASKEL France	SERTRONIC
HERA France / ALBHYON	Sylfen
HINICIO	SymbioFCCell
HP Systems	Tronico-Alcen
Hydrogène de France	WH2

Tableau

Les membres de l'AFHYPC représentent tous les secteurs ayant un pouvoir de décision ou étant dépendants du développement de la mobilité hydrogène.

Collège « Associations, collectivités territoriales, pôles de compétitivité et groupements divers »	
AVERE-France	Métropole Rouen Normandie
Communauté d'Agglomération du Grand Dole	Mission Hydrogène
Conseil Départemental de la Manche	PHyRENEES
Conseil National des Professions de l'Automobile	Pôle d'Excellence Energie 2020
Grenoble Alpes Métropole	Pôle Véhicule du Futur
	Tenerrdis
Collège « Personnes physiques »	
30 adhérents	

