



LES TECHNOLOGIES ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

DES SOLUTIONS POUR L'ATTÉNUATION ET L'ADAPTATION

Rapport de l'Académie des technologies

Voté avril 2016

SOMMAIRE

EN BREF	5
INTRODUCTION	7
AGRICULTURE, FORÊTS ET SOLS	13
L'atténuation par les forêts et l'adaptation des forêts aux changements climatiques	13
L'atténuation des émissions par le secteur agricole et son adaptation	14
La restauration des sols dégradés et le stockage supplémentaire de carbone organique des sols	15
EAU, OCÉAN, LITTORAL, TERRES BASSES ET ÉVOLUTION DU CLIMAT	17
Eau continentale et évolution du climat	17
Modification des ressources hydriques	18
Ce que dit le GIEC	19
De multiples études régionales ou nationales sont effectuées à l'occasion des nombreux grands projets de transferts d'eau, par exemple au Maghreb.	20
Mers et océans	21
Impacts sur le littoral et les terres basses	23
Les technologies d'adaptation et d'atténuation	25
BÂTIMENT, URBANISME, MOBILITÉ, TRANSPORT	27
Évolutions tendanciennes	27
a / Dans le champ économique et social	27
b/ Dans le domaine des transports et de la mobilité	27
c/ Dans le champ de la construction	28
d/ La ville insérée dans son voisinage proche et plus lointain (l'inter-cité et l'environnement rural)	29
Comment surmonter les difficultés ?	29
L'approche systémique	29
Une vision politique cohérente et globale	30
ÉNERGIE	33
Rappel sur la structuration des flux énergétiques des activités humaines	33
La demande pour les nombreux usages de l'énergie	34
Les ressources et les énergies primaires	34
L'électricité, vecteur énergétique essentiel	35
La résilience des installations énergétiques	37
ÉCONOMIES D'ÉNERGIE DE L'INDUSTRIE FRANÇAISE ET BIOÉCONOMIE	39
Les économies d'énergie de l'industrie française	39
La bioéconomie	39
TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION	43
Le secteur des TIC et la consommation énergétique	43
Les TIC facteur d'économie dans l'industrie	44
LA GÉO-INGÉNIERIE DU CLIMAT	47
Les technologies de gestion du rayonnement solaire	47
Les technologies d'extraction du carbone de l'atmosphère	49
Conclusions	49
EMPLOI, COMPÉTENCES ET FORMATIONS	51
La pratique de l'analyse du cycle de vie dans la société française	51
L'engagement de l'institution éducative dans la formation générale et professionnelle des jeunes	51
La priorité à la formation continue	52
Recommandations de l'Académie des technologies visant à accompagner la mise en œuvre des décisions de la COP21	55
Recommandations sectorielles	55

Agriculture, forêts et sols	55
Eau, océans, littoral et terres basses	55
Bâtiment, urbanisme, mobilité, transport	56
Énergie	57
Industrie et bioéconomie	57
Technologies de l'information et de la communication (TIC)	57
Géo-ingénierie	58
Emplois, compétences et formations	58
Recommandations générales.....	58
Annexes	60
Annexe I – PANORAMA GÉNÉRAL ET ORDRES DE GRANDEUR.....	60
Les émissions globales	60
Les activités économiques et leur décarbonisation	60
Figures et tableaux	61
Annexe II – LE PRIX DU CARBONE DES ÉCONOMISTES	65
Taxe ou marché de permis ?	65
Les enseignements du marché européen	66
Le délicat problème des interactions	66
La croissance verte et ses opportunités	66
Liste des contributions	69
Sigles utilisés	71
Références	73

EN BREF

1. L'Académie des technologies consciente du défi posé par le changement climatique, fait un bilan du potentiel technologique mobilisable ou à développer. En effet l'inaction aurait des conséquences graves, inacceptables pour la France et aussi mondialement.
2. Les propositions mettant en œuvre un ensemencement de l'atmosphère ou de l'océan ne seront efficaces ni pour la limitation des émissions de gaz à effet de serre (GES)¹ ni pour l'atténuation des effets à des fins d'adaptation. La géo-ingénierie du climat, dans l'état actuel des connaissances, ne constitue pas une solution de remplacement.
3. L'Académie des technologies a voulu identifier les conditions à favoriser globalement, et dans les secteurs les plus contributeurs, pour diminuer les émissions de ces gaz et pour promouvoir des mesures d'adaptation préventives. Attacher un prix à la tonne de CO₂ - équivalent émise est pour cela essentiel.
4. Dans les mesures d'efficacité énergétique, le coût des investissements nécessaires doit être inférieur à la valeur de l'énergie économisée plus, si cette énergie n'est pas décarbonée, la valeur des tonnes de CO₂ non émises. Pour toutes les technologies d'atténuation, il est souhaitable d'en mesurer les coûts et les bénéfices et de veiller à ce que l'amortissement et la gestion ultérieure ne nécessitent pas de subventions non proportionnées à l'économie d'émissions de GES.
5. Les États et l'Europe ont un rôle incitatif important à jouer à travers l'établissement de normes ou d'un cadre permettant d'affecter un prix au carbone émis. Les entreprises et les acteurs collectifs de leur côté devraient dès maintenant évaluer leurs investissements futurs en fixant un prix interne de la tonne de CO₂ - équivalent émise. Ce prix serait choisi dans une fourchette établie de prix comme le suggère la plateforme énergie d'Euro-CASE.
6. L'implication de la société civile, les modifications des modes de vie et des comportements orientées vers une société sobre en carbone joueront un rôle important dans la réduction des émissions de GES. Des actions de sensibilisation sont nécessaires pour rendre les évolutions applicables, acceptables et assimilables. L'éducation et la formation doivent intégrer ces dimensions.
7. Les pays en développement souvent plus vulnérables aux changements climatiques devront faire l'objet d'une attention particulière de la part des acteurs publics et privés, pour évaluer avec eux les facteurs clés d'adaptation et les technologies disponibles ou à développer, et pour mobiliser les financements nécessaires.
8. Dans de multiples domaines, le plus fort potentiel d'atténuation et d'adaptation préventive viendra du développement de **nouvelles technologies** :
 - **Agriculture, forêts et sols** : stockage augmenté de carbone dans les sols par une meilleure maîtrise des pratiques agricoles et de leurs milieux microbiens ; limitation des émissions de N₂O par la gestion précise de la fertilisation ; prévention de la déforestation et adaptation des modes de gestion des forêts.
 - **Mers, océans, littoraux** : prévention des risques ; développement des aménagements *offshore* ; production d'énergie utilisant courants et marées, ou de biomasse ; poldérisation.
 - **Bâtiments, urbanisme, mobilité, transport** : apport de solutions globales pour les villes ; diversification de l'offre de mobilité ; développement des services de proximité ; suppression des blocages réglementaires (mutualisation énergétique entre bâtiments ou gestion de bâtiments multi-usages à énergie positive) ; emploi de matériaux à fort taux de carbone (bois) ; réduction des émissions des moyens de transport.
 - **Énergie** : production progressivement décarbonée ; stockage de l'électricité et flexibilité des systèmes électriques ; poursuite de la R&D sur le captage et stockage de carbone. Les évolutions

¹ Les GES principaux sont : le gaz carbonique (CO₂), le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O).

dans ce secteur, notamment par la modification des pratiques d'usage, sont majeures pour parvenir à diminuer les émissions de GES.

- O **Technologies de l'information et de la communication (TIC)** : mutualisation des infrastructures physiques (dont les réseaux pour les téléphones mobiles), utilisation de systèmes informatiques économes en énergie ou utilisant l'énergie récupérée ; développement de l'usage des TIC dans l'industrie et les services pour améliorer l'efficacité énergétique.
- O **Bioéconomie** : un prix attaché au carbone émis rendra attractifs les procédés de la Bioéconomie grâce à leur bon bilan global d'émissions. L'Académie des technologies souhaite dans ce domaine, l'établissement et la mise en application d'une feuille de route nationale.

Plus généralement, l'Académie des technologies recommande que tous les secteurs fortement émetteurs soient incités à agir en mettant en œuvre de nouveaux procédés et organisations dont le coût soit proportionné aux économies d'émissions.

INTRODUCTION

Les climatologues confirment une élévation de la température moyenne à la surface de la terre de 1 °C depuis le début de l'ère industrielle. En cause première, les émissions de gaz carbonique (dioxyde de carbone – CO₂) dues à la combustion du charbon, du pétrole et du gaz. D'autres gaz à moindre durée de vie sont également en cause comme le méthane (CH₄) ou le protoxyde d'azote (N₂O).

La teneur en CO₂ de l'atmosphère était de 285 ppm² au début de l'ère industrielle, elle est actuellement de 400 ppm. On constate que la planète ne peut plus aujourd'hui métaboliser ces émissions excessives de dioxyde de carbone et des autres gaz contribuant à l'effet de serre. Cette accumulation agit comme un forçage, à savoir une contrainte permanente, modifiant le bilan thermique de la Terre avec, pour conséquences, un réchauffement moyen, une lente élévation du niveau des océans et, vraisemblablement, la montée en fréquence et en amplitude de manifestations climatiques extrêmes : vagues de chaleur et canicules, précipitations excessives ou sécheresses intenses. Le constat est sans appel : l'homme est devenu un acteur du climat. Les complications de cette « fièvre chronique » que nous imposons à la Terre risquent de revenir en boomerang si nous ne changeons pas dès maintenant nos modes de vie, la trajectoire du progrès, les outils la permettant, et si nous ne savons pas en gérer les impacts. Le processus est enclenché et compte tenu de l'inertie du phénomène, les gaz à effet de serre (GES) resteront durablement dans l'atmosphère.

En choisissant comme devise *Pour un progrès raisonné, choisi et partagé* et en adoptant comme logo une main humaine serrant une main mécanique, l'Académie des technologies a voulu souligner dès sa fondation qu'elle aborderait dans ses rapports, ses recommandations et ses avis l'ensemble des relations entre les technologies et tous les aspects économiques, sociaux et environnementaux des activités humaines.

Elle a donc été naturellement conduite à s'informer sur l'évolution d'année en année des négociations internationales dans le cadre de la Convention des Nations Unies de 1992 et elle a été amenée à traiter certains aspects des émissions de gaz à effet de serre, notamment dans ses études sur l'énergie. Il lui a semblé que, dans la dynamique de la COP 21 qui s'est tenue à Paris et a marqué une étape importante dans la construction d'une politique mondiale dans le domaine du climat, mais qui ne constitue en rien la fin d'un processus qui se déroulera sur de nombreuses années, elle pourrait faire œuvre utile, non en présentant une synthèse technologique du sujet qui se perdrait dans le tumulte médiatique des mois suivants, mais un texte qui aurait toute sa valeur au cours de l'année 2016 où, toujours sous présidence française, l'attention se centrera sur la mise en œuvre des décisions de la COP 21.

L'Académie des technologies a pensé que sa contribution devrait se concentrer sur des recommandations d'études spécifiques qui, en aval des travaux du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) et, selon les cas, à l'échelle mondiale, européenne ou française, mériteraient d'être poursuivies. Elle couvrirait un spectre très large allant de l'agriculture aux forêts, de l'eau à l'océan et au littoral, du bâtiment à la mobilité et aux transports, de l'énergie à la Bioéconomie, de la géo-ingénierie du climat aux compétences et formations souhaitables pour maîtriser le climat.

C'est le génie technologique qui a permis d'exploiter les ressources fossiles ou encore de fertiliser les champs, souvent en excès, afin de satisfaire les besoins croissants de l'humanité. Pour les années à venir, ce même génie technologique devra être mobilisé pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, voire les stocker, et pour mieux anticiper et gérer les impacts des changements climatiques.

² ppm = partie par million, 1 ppm représente 1 molécule de CO₂ pour 10⁶ molécules présentes dans l'air.

Aujourd'hui, même si des incertitudes demeurent dans les résultats précis des simulations du GIEC, en particulier sur la température moyenne du globe en fonction des scénarios d'émission de CO₂ dans l'atmosphère pour le XXI^e siècle, les tendances historiques observées depuis des décennies se confirment, une décennie après l'autre. Aussi, les mesures d'adaptation préventives s'imposent dès maintenant. Les voies sont multiples et concernent : l'agriculture et la foresterie, l'énergie, l'urbanisme et les transports, l'industrie, les protections côtières, les accès à l'eau salubre, les nouveaux modes de production ou l'économie du partage, la gestion sobre et adaptative des ressources ainsi que leurs usages... Il est impératif d'intensifier les actions déjà engagées et d'en pérenniser les financements, notamment auprès des populations les plus vulnérables face aux changements climatiques qui, ironie du sort, sont pour une grande majorité les plus démunies.

C'est sur le développement de nouvelles technologies que reposera le plus fort potentiel d'atténuation dans de multiples domaines.

L'efficacité du développement des innovations technologiques et leur déploiement à grande échelle reposeront en grande partie sur l'engagement des États, se traduisant par l'établissement de normes, la création d'un marché du carbone, des crédits d'impôts... Le transfert des technologies aux pays en développement et la conception de technologies adaptées à ces pays dépendront de la mise en place d'incitations financières. Cela étant, les techniques et les technologies nouvelles ne sont qu'une partie de la solution, elles doivent être apprivoisées, adoptées, diffusées, et donc être compatibles avec les dynamiques sociales et éthiques en cours pour contribuer efficacement à l'atténuation du changement climatique et à l'adaptation à ce changement.

L'Académie des technologies pense que les mesures étudiées pourraient faire l'objet d'une approche s'inspirant dans la mesure du possible des orientations suivantes :

- pour toute solution proposée, il est nécessaire d'examiner si elle est plus favorable pour la collectivité considérée que les autres mesures qui pourraient être envisagées. Pour cela, l'utilisation de l'analyse de cycle de vie, si c'est possible, doit être recommandée ;
- pour ces appréciations, il est souhaitable de raisonner en bilans généralisés, de coûts et d'avantages, étant entendu que ces bilans :
 - ne prennent en compte que des coûts et des avantages futurs et leur répartition dans le temps,
 - intègrent, en plus des prix et des données économiques futures estimées, des évolutions chiffrées explicites, des avantages et des dégâts sociaux ou environnementaux associés à chaque solution ;
 - cette approche pose évidemment la question du prix à attacher à la tonne de CO₂ - équivalent émise.

L'Académie des technologies recommande :

- *de chiffrer le rapport coût/bénéfice de chaque solution et de raisonner en bilans généralisés,*
 - *d'attacher un prix à la tonne de CO₂ - équivalent économisée.*
-

INTRODUCTION

S'il existait un tel prix (comme il en existe pour le pétrole, le gaz naturel et le charbon), beaucoup des effets négatifs sur le revenu mondial de l'hétérogénéité des décisions prises pour éviter des émissions de GES (une hétérogénéité qui prend implicitement en compte, tantôt des valeurs de plusieurs centaines d'euros à la tonne, tantôt de quelques euros seulement) seraient évités. Aussi, certains proposent que la COP s'accorde sur un prix qui serait payé par tous les émetteurs significatifs, la recette étant utilisée à financer, notamment dans les pays pauvres, les actions d'atténuation et d'adaptation des phénomènes climatiques. Mais cette solution est actuellement hors de portée. Tel pays qui accepte sans rechigner de payer son pétrole au cours mondial refuserait absolument que la tonne de CO₂ émise soit pour lui aussi chère que pour un pays développé.

Ce problème ne peut donc être abordé que progressivement ; une possibilité est de laisser des politiques s'établir par groupes de pays et peut-être de donner une indication mondiale sur ce que serait un prix souhaitable. Elle irait de pair avec des initiatives régionales, ces initiatives régionales pouvant s'orienter, soit vers une taxe à la tonne émise, soit vers l'instauration d'un marché de droits de tirage distribués par enchères, comme aujourd'hui à l'intérieur de l'Union Européenne.

L'Union européenne a créé un tel marché en 2005, marché qui a été progressivement étendu et amélioré. Ce marché a techniquement fonctionné, mais le prix qui s'établit dépend de la quantité de droits émis et de la demande qui résulte de la conjoncture économique. Or, l'effondrement des taux de croissance européenne depuis 2008 a eu pour conséquence un volume trop élevé de droits de tirage mis aux enchères et un effondrement du prix de la tonne de CO₂, actuellement aux alentours de 7 dollars, prix que beaucoup jugent trop faible pour être efficace.

Ce sujet n'est pas, à proprement parler, de la compétence de l'Académie des technologies, mais cette dernière pourrait néanmoins alimenter la réflexion de deux manières :

- d'une part en participant avec d'autres organisations à l'étude du sujet ;
- d'autre part, en examinant si elle ne devrait pas se donner à elle-même, dans ses travaux, une valeur de la tonne de CO₂ économisée.

Ce serait, par ailleurs, l'occasion de rappeler que dans les études d'efficacité énergétique, le coût des investissements nécessaires doit être inférieur à la valeur de l'énergie économisée plus, si cette énergie n'est pas décarbonée, la valeur des tonnes de CO₂ non émises.

Au-delà du cadre économique, l'Académie des technologies est également consciente de la nécessité de comprendre et de prendre en compte la dimension sociale qui entoure la question du changement climatique.

La mise en œuvre de solutions pour lutter contre les effets négatifs du changement climatique dépend tant des États et des initiatives portées par les acteurs non gouvernementaux (entreprises, collectivités territoriales), que de l'implication de la société civile au sens large. En effet, les modifications des modes de vie et des comportements, orientées vers une économie sobre en carbone, d'origine notamment fossile, joueront un rôle important dans la réduction des émissions de GES.

Aujourd'hui en France environ 80 % des citoyens acceptent, et prennent au sérieux, le consensus scientifique existant autour de la question du changement climatique, et deux Français sur trois se disent prêts à agir au quotidien pour diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Néanmoins, il n'est pas exclu que le bien commun que représente la préservation de la planète ne se fragmente en intérêts particuliers, conduisant à une inaction générale.

Alors comment peut-on inciter chacun à s'impliquer dans la lutte contre les effets négatifs du changement climatique ? Force est de constater que les incitations économiques peuvent ne pas produire les résultats

escomptés (effet rebond, à savoir l'augmentation de consommation liée à la réduction des limites à l'utilisation d'une technologie). C'est pourquoi d'autres types d'incitations sont également à envisager. D'une part, on peut identifier le paternalisme libertaire, consistant à inciter les personnes à prendre une décision dans le sens de l'intérêt général, sans les contraindre, ni par la loi ni par intérêt direct, mais plutôt en employant une architecture du choix qui favorise cette décision. Dans ce champ, beaucoup de pistes sont à explorer, par exemple autour de l'acte de consommation énergétique, dont le citoyen ne prend pas toujours la mesure. D'autre part, développer la démocratie participative ou délibérative associant ainsi les individus aux décisions. Néanmoins, il manque aujourd'hui dans ce champ une ingénierie sociale qui permette, notamment, d'assurer la représentativité de l'instance, d'éviter les effets de polarisation de groupe, ou encore de gérer la convergence collective vers les biais cognitifs. Cette approche doit donc être employée avec beaucoup de discernement, le danger étant, là encore, la fragmentation du bien commun en intérêts particuliers.

Par ailleurs, il ne faut pas oublier l'influence qu'une représentation collective peut avoir sur l'implication de chacun, sur le choix d'agir ou, au contraire, de ne pas agir. Dans l'imaginaire populaire récent, la question du changement climatique est adossée à des scénarios apocalyptiques et à un schéma de pensée, dans lesquels l'homme va disparaître en raison de son action technologique nuisible sur l'environnement. Ce schéma de pensée conduit à une erreur de logique fondamentale : on ne peut pas prédire ce qu'une découverte technologique va produire de positif ou de négatif ; en interrompant à l'aveugle une arborescence technologique dont on craint les conséquences négatives, on risque également de priver les générations futures de bienfaits qui pourraient améliorer l'avenir de l'humanité. Aussi, le principe de précaution, aujourd'hui focalisé sur les conséquences de notre action, pourrait donc être rééquilibré, en lui ajoutant la prise en compte des conséquences de notre inaction.

Ces remarques ont pour but de présenter le cadre d'ensemble dans lequel vont être développées quelques recommandations sur l'exploration de problèmes soulevés par le changement climatique sur la base des décisions de la COP 21.

Il ne s'agit pas de « sauver la planète » mais de limiter les menaces qui pèsent sur le vivant (gérer les populations, les communautés d'êtres vivants et leurs diversités), pour éviter la dégradation des ressources en eau, des sols ainsi que les dégâts, environnementaux et économiques causés par les manifestations climatiques extrêmes et les déplacements de populations à venir, avec les risques de conflits afférents à la quête de terre d'accueil et de nourriture. La lutte contre le changement climatique est un enjeu de civilisation au même titre que celui de la paix dans le monde.

Les efforts qui seront fournis au cours de la prochaine décennie pour stabiliser puis inverser la courbe des émissions de GES seront déterminants.

Convaincue par l'importance de l'anticipation et de l'action, l'Académie des technologies a travaillé – grâce à ses compétences internes et en auditionnant des professionnels externes – sur les secteurs les plus émetteurs de gaz à effet de serre ou les plus affectés par les changements climatiques.

L'Académie des technologies recommande que le principe de précaution soit rééquilibré en lui ajoutant les conséquences de l'inaction.

INTRODUCTION

Elle a ainsi approfondi les technologies aptes à préserver les capacités de stockage de carbone des forêts ou des sols agricoles, comme celles qui permettront une bonne résilience des productions les plus sensibles à l'exemple de la viticulture. Elle a étudié le rôle des masses d'eau des océans dans les régulations, et les technologies permettant d'améliorer la gestion des systèmes hydrologiques ou la protection des zones côtières. Elle s'est intéressée aux liens entre bâtiment, urbanisme, mobilité et transport, à leurs évolutions en lien avec les changements climatiques. Elle a mobilisé les experts du monde de l'énergie pour cibler les actions les plus efficaces à un coût acceptable. Elle a abordé les contextes économiques et/ou juridiques dans lesquels les potentiels d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre pouvaient être déployés dans l'industrie, elle a souligné les rôles particuliers des outils tels que l'analyse du cycle de vie, ou l'intérêt du développement de la Bioéconomie. Elle a poursuivi l'examen des capacités des technologies de l'information et des communications (TIC) pour optimiser les dépenses énergétiques alors qu'elles sont également consommatrices d'énergie. La recherche du meilleur bilan relatif aux GES est au centre du débat, sachant que ces technologies sont devenues indispensables à d'autres secteurs, notamment pour la simulation, pour l'aide à l'innovation et à la conception d'objets nouveaux.

Au-delà de ces approches sectorielles, l'Académie des technologies a souligné les conditions économiques et sociales de la transition vers des modèles plus favorables, ainsi que les conditions de formation propres à favoriser l'emploi lié à ces transitions.

Sur chacun de ces sujets, elle a choisi de mettre en avant quelques recommandations essentielles mobilisant des changements technologiques, entendus dans leur sens large. Ces démarches font l'objet de présentations succinctes dans les chapitres suivants.

Toutefois, certains thèmes feront l'objet de travaux complémentaires au cours de l'année 2016 ; ils nourriront un rapport complémentaire de l'Académie des technologies avant la fin de la présidence française de la conférence des parties, en novembre prochain.

AGRICULTURE, FORÊTS ET SOLS

Ce secteur de l'agriculture, des forêts et des sols a deux caractéristiques, celle de pouvoir stocker du carbone en quantité, notamment dans les forêts et dans les sols, et celle de subir de plein fouet les changements climatiques et donc de devoir s'y adapter impérativement.

Au niveau mondial, ce secteur émet 24 % du total des émissions de gaz à effet de serre d'origine humaine [rapport GIEC 2014 [4]].

	% des émissions mondiales de GES
Production agricole et élevage (N ₂ O et CH ₄ principalement)	11
Changement d'usage des terres : déforestation et urbanisation (CO ₂)	10
Feux de tourbières et de forêts	3

En incluant la transformation de forêts en terres agricoles (culture du soja, du maïs, du palmier à huile et de l'hévéa), l'agriculture et l'élevage sont à l'origine d'environ 20 % des émissions totales de GES d'origine humaine.

Après les économies d'énergie, c'est dans son champ que les techniques d'atténuation au moindre coût des émissions de gaz à effet de serre se rencontrent [McKinsey [5]]. Le rapport du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat [rapport GIEC 2014 [4]] quantifie les réductions réalistes qui pourraient être obtenues, en fonction du prix de la tonne d'équivalent carbone, et les estime à 20 à 60 % des réductions potentielles au niveau mondial.

Les forêts mondiales contiennent 40 à 53 % du carbone de la biosphère terrestre. 60 % des forêts mondiales sont gérées et même si le temps de résidence du carbone n'y est que de 10 à 1 000 ans, certains modes de gestion seront plus favorables que d'autres au stockage net de carbone. Le stock de carbone dans les sols au niveau mondial, sur les 40 premiers centimètres, est estimé à 820 Gt de carbone [C] [rapport GIEC 2014 [4]] sans compter le permafrost. Là aussi, les flux sont significatifs et dépendent notamment des changements d'usage des sols (déforestation, retournement des prairies, érosion...). Le secteur agricole, pour sa part, a la particularité d'émettre plus de gaz à durée de vie courte, protoxyde d'azote (N₂O) et méthane (CH₄), que de gaz carbonique (CO₂). Ainsi en France, sur les 20 % du total des émissions venant de ce secteur, 50 % est constitué de N₂O, 40 % de CH₄ et 10 % de CO₂.

L'atténuation par les forêts et l'adaptation des forêts aux changements climatiques

Dans le secteur forestier, l'effet net de séquestration du carbone est avéré et l'utilisation de biomasse ligneuse comme matériau, matière première ou combustible, en substitution à du carbone fossile contribue également à diminuer les bilans de gaz à effet de serre (GES). En France, les forêts stockent 15 % des émissions et 20 % si l'on ajoute les émissions évitées par la substitution de bois ressource au carbone fossile dans des utilisations énergétiques ou autres [Pan *et al.*, 2011 [6]]. Plusieurs événements climatiques extrêmes (sécheresses et tempêtes) ont endommagé les forêts françaises au cours des dernières années et

ont fait prendre conscience de l'importance à accorder aux diagnostics de vulnérabilité des peuplements, aux stratégies d'adaptation des forêts (évolution de la composition et diversité génétique des peuplements, migration des espèces vers des environnements plus favorables, pratiques plus dynamiques de gestion, aménagement des massifs) et au suivi permanent des effets des changements globaux.

Les technologies sont mobilisées dans quatre champs principaux :

- l'acquisition, le stockage, l'analyse et le partage des données sur les sols, les racines, la biomasse ou l'état de santé des forêts ;
- la modélisation des impacts afin de mettre au point des outils d'aide à la décision pour les gestionnaires des forêts ;
- les techniques de sylviculture – y compris à travers la plantation d'espèces à sélectionner ;
- le développement de machines adaptées pour le débardage en forte pente, ayant un moindre impact sur les sols ou permettant une exploitation des ressources de feuillus.

Les freins dans ce secteur semblent ici financiers et sociologiques plus que technologiques.

L'atténuation des émissions par le secteur agricole et son adaptation

La feuille de route européenne pour 2050 fixe l'objectif ambitieux de 42 à 49 % de réduction des émissions agricoles par rapport à 1990. L'Institut national de la recherche agronomique (INRA) a conduit une expertise à la demande des pouvoirs publics français sur les techniques à développer pour diminuer les émissions de GES [7]. Les actions les plus efficaces portent sur le méthane avec, d'une part, la production contrôlée de méthane à partir des déchets et lisiers en substitution d'énergies fossiles et, d'autre part, la réduction de l'émission de méthane par les ruminants, par exemple en adaptant l'alimentation des animaux [8].

Pour le protoxyde d'azote, la « fertilisation de précision » est la manière la plus efficace de réduire les émissions mais cela passe par la mise au point de capteurs, l'évolution des machines agricoles et la gestion des masses de données pour affiner les outils d'aide à la décision.

De manière plus prospective, une meilleure connaissance et utilisation des milieux racinaires et des interactions des microbes et micro-organismes avec les plantes peut laisser espérer dans l'avenir la mise en culture de céréales ayant la capacité d'absorber directement l'azote de l'air – à l'image de ce que font les légumineuses. Enfin, des pratiques agricoles telles que le labour superficiel ou épisodique, à condition que ce changement soit accompagné d'autres changements permettant d'éviter la prolifération de mauvaises herbes, ont des effets positifs en matière de réduction des GES.

En matière d'adaptation, il faut souligner les travaux conduits dans le secteur viticole, très sensible aux changements de température et aux parasites notamment. Les dates des vendanges ont été avancées de 2 à 3 semaines depuis 1980 (J.M. Touzard, communication personnelle) et pour la plupart des céréales les rendements ont stagné. La prise en compte des fonctions écologiques de certains milieux ou compartiments (sol, arrangement des parcelles, compétition alimentaire...) dans les pratiques agricoles (on parle alors de pratiques agro-écologiques) peuvent permettre d'augmenter la robustesse des systèmes agricoles. Des outils sont également à développer à une échelle plus collective comme les assurances contre les événements climatiques extrêmes, les services de conseil ou les prévisions météorologiques locales. De plus, la majorité de l'eau « bleue » (i.e. des rivières, lacs, nappes souterraines) est consommée par l'agriculture. Cela souligne le besoin de développer des schémas de gestion durable de l'eau par bassin, incluant l'adoption de techniques économes en eau, le stockage et la répartition organisée de la ressource dans les zones déficitaires (cf. chapitre suivant).

La restauration des sols dégradés et le stockage supplémentaire de carbone organique des sols

En France, le stock de C dans les 30 premiers centimètres de sol est estimé à 3,2-3,6 Gt [9]. Toutes les initiatives visant à restaurer ou à améliorer la qualité des sols et à préserver les sols fertiles riches en matière organique remplissent un triple objectif de stockage de carbone, d'amélioration de la production agricole et de résistance des sols à l'érosion. Elles contribueront également à la fois à l'atténuation des émissions globales et à une meilleure adaptation des sols aux changements climatiques, par l'augmentation de leur capacité de rétention d'eau. Complémentairement, ne pas perdre de carbone en évitant le retournement des prairies, la déforestation (Guyane), l'érosion (Normandie) ou l'artificialisation des sols jouera un rôle important. Aussi, ces mesures collectivement favorables – et sous réserve de l'estimation de leur coût par rapport au prix attribué à la tonne de carbone économisée – devraient être encouragées à travers les mesures agro-environnementales régionales financées par la politique agricole commune et, le cas échéant, par le prix carbone. Il faut rester attentif toutefois à la permanence de ce stockage, aux limites quantitatives du stockage dans un sol et aux effets que l'arrêt des « pratiques favorables au stockage » pourrait avoir.

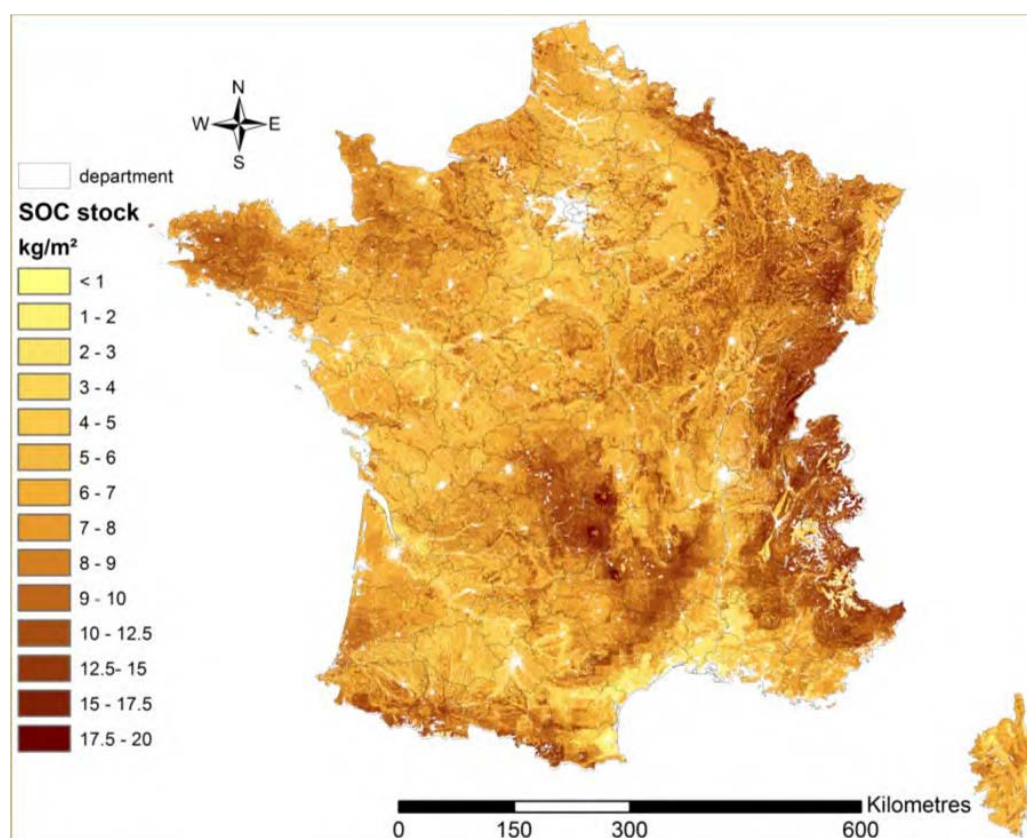


Figure 1.1 : Distribution spatiale du carbone organique du sol en France [modélisation Meersmans et al., 2012 [10]].
SOC = Soil Organic Carbon.

Par ailleurs, pour mieux assurer l'efficacité de ce programme, il faut améliorer les connaissances sur les mécanismes de séquestration et de perte du carbone des sols et sur les modalités d'adoption des stratégies favorables. Il faut, en outre, investir sur des technologies rapides et moins coûteuses de mesure pour assurer le suivi et la vérification des pratiques. L'initiative 4 pour 1000 (4PM) lancée le 7 juillet 2015 par le Ministre de

l'Agriculture à Paris vise à mobiliser les chercheurs à travers le monde pour établir quels sols peuvent être améliorés et comment³. Elle fait partie de l'agenda des solutions au niveau mondial.

Recommandations

Trois « sauts technologiques » sont nécessaires pour assurer les objectifs cités ci-dessus, auxquels il conviendra d'ajouter les voies approfondies par le groupe de travail de l'Académie des technologies concernant les nouvelles technologies agricoles (Commission Biotechnologies). Il s'agit :

- d'approfondir la connaissance des communautés microbiennes des sols et de leurs effets ; ces communautés, en interaction avec le système racinaire, permettent l'absorption de l'azote de l'air par certaines plantes (légumineuses) ; ainsi cette capacité de fixation si elle était élargie à d'autres espèces pourrait conduire à diminuer les apports par les engrais et de là à réduire l'utilisation du carbone fossile nécessaire à la production des engrais.*
 - de mettre au point des outils de mesure rapides et parfois à distance des caractéristiques des sols ou de la biomasse, d'établir des bases de données collectives, d'utiliser la modélisation et la simulation pour mettre au point ou améliorer des outils d'aide à la décision et ainsi améliorer les pratiques agricoles, par exemple dans l'utilisation de traitements sanitaires.*
 - de simuler, modéliser et délibérer collectivement sur les aménagements souhaitables ou nécessaires pour adapter les forêts comme les zones agricoles aux nouvelles conditions climatiques, en interaction avec les acteurs concernés, comme cela s'est fait en Aquitaine ou dans plusieurs États Nord-américains.*
-

³ En augmentant la matière organique des sols agricoles chaque année de quatre grammes pour mille grammes de CO₂, l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre produits par la planète en un an serait compensée (initiative INRA : <http://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/1509-climat-4pour1000-fr-bd.pdf>).

De fait, aujourd'hui il s'agit d'abord de freiner le déstockage de carbone des sols lié à leur dégradation.

EAU, OCÉAN, LITTORAL, TERRES BASSES ET ÉVOLUTION DU CLIMAT

L'eau est omniprésente à la surface de la planète, eau douce et eau salée, eau continentale de surface et souterraine, eau des mers et des océans. Elle est indispensable à la vie, elle est aussi employée à diverses fins, par exemple pour la production d'énergie ou comme support pour des moyens de transport (fluviaux ou maritimes). Par ailleurs, la dynamique climatique est liée à celle des grandes masses océaniques et de la répartition atmosphérique. Réciproquement, son cycle est modifié par l'évolution du climat. De ce fait divers usages en dépendent (agriculture, énergie, eau potable et domestique, autres usages), elle peut aussi être un facteur de risque (inondations, pluies intenses, sécheresses, coulées torrentielles). Elle permet la diffusion et le transport d'éléments minéraux ou organiques. Enfin, la lecture « au fil de l'eau » est un bon moyen de suivi, de compréhension des activités humaines et de leurs effets sur l'environnement. Cette unité, liée fondamentalement au cycle de l'eau, rend souhaitable d'exposer dans un même chapitre des questions des hydrosystèmes continentaux et celles des systèmes marins et océaniques. L'idée est d'éviter de se noyer dans une trop grande généralité, mais de rappeler quelques données essentielles et d'insister sur les développements technologiques nécessaires pour tenir compte des évolutions en cours, de les tempérer et, même, de les considérer comme des opportunités pour l'innovation.

Eau continentale et évolution du climat

Les impacts attendus du réchauffement climatique sur les différentes formes d'eau sont divers et très importants. Certains commencent à être bien documentés, d'autres font l'objet de recherches et d'approfondissements afin de les établir solidement, de raffiner les modèles prévisionnels et d'orienter les politiques publiques. Parmi les principaux effets observés ou attendus on peut citer :

- les modifications de précipitations et de débits des cours d'eau, mais pas dans tous les lieux et de façon différenciée selon ces lieux (à la hausse ou à la baisse) ; les scénarios des modèles prédisent un accroissement des précipitations dans certaines régions et une diminution dans d'autres. Sachant que l'état actuel est déjà très inégal, les variations futures, qu'elles soient à la hausse ou à la baisse, auront à la fois des impacts bénéfiques et des impacts défavorables (cf. figure 2.1) ;
- les modifications attribuées au réchauffement climatique non directement corrélées aux variations locales de température car elles sont dues aux modifications à la grande échelle des systèmes météorologiques ;
- les scénarios pour la France métropolitaine qui sont d'une grande incertitude car la métropole est située dans une zone intermédiaire entre des zones où les précipitations moyennes pourraient baisser et celles où elles pourraient augmenter ; néanmoins des baisses de précipitations annuelles sont envisagées en particulier en zone méditerranéenne [12] ;
- la fonte de glaciers continentaux (dont certains sont des réserves d'eau douce permettant aux utilisateurs d'étaler l'utilisation de la ressource entre les saisons).

Ces impacts sont documentés au niveau mondial par le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dont les derniers rapports sur le sujet sont Changements climatiques : éléments scientifiques de 2013 [13] et Incidences, adaptation et vulnérabilité de 2014 [14]. Les impacts prédits auront de tels effets sur la gestion de l'eau que ce secteur est l'un des plus concernés, si ce n'est le premier concerné, par les besoins de politiques d'adaptation au changement climatique. Ils font l'objet de nombreux

travaux de recherche et, déjà dans de nombreux pays, les investissements dans les infrastructures tiennent compte des changements à venir malgré les incertitudes correspondantes.

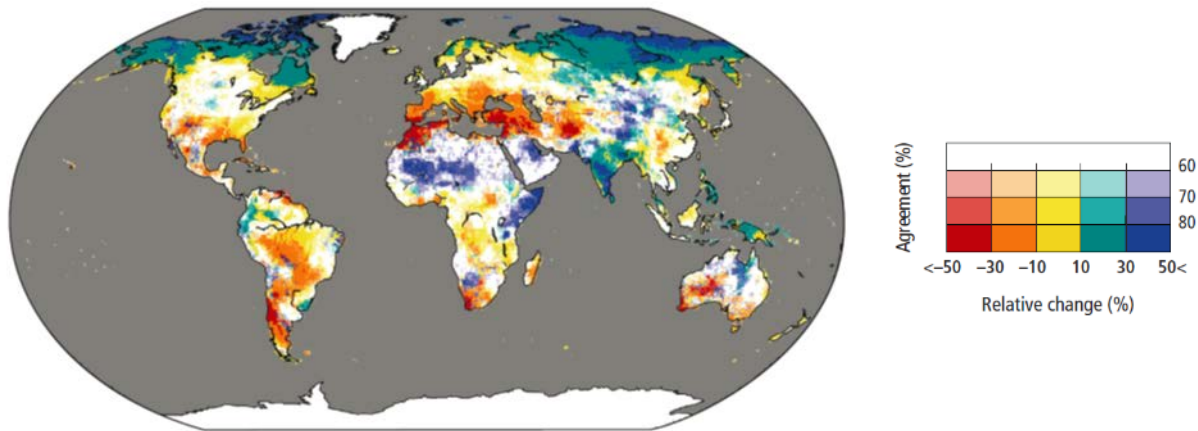


Figure 2.1. Changement, en pourcentage, de la moyenne annuelle des ruissellements pour une augmentation moyenne de 2 °C par rapport à la période 1980-2010 ou de 2,7 °C au-dessus de celle de la période préindustrielle. Les spectres de couleur à droite montrent la variation de la moyenne calculée par 5 modèles de circulation générale (General Circulation Models, GCMs) et 11 modèles hydrologiques globaux (General Hydrological Models, GHMs). La saturation montre la concordance du sens du changement à travers les 55 combinaisons GHM-GCM (pourcentages de simulations en concordance avec le changement de signe) [Schewe et al., 2014 [15]]⁴

À noter que dans beaucoup de pays, l'impact anthropique sur les systèmes hydrologiques est d'une telle ampleur que de nombreux effets du réchauffement climatique sont des facteurs d'aggravation de défis existants plutôt que de nouveaux défis.

Modification des ressources hydriques

Une partie des précipitations d'eau ruisselle ou s'infiltre jusqu'aux nappes souterraines, c'est l'eau bleue ; une partie s'infiltre seulement dans le sol puis est reprise par les racines et évapotranspirée principalement par la végétation, c'est l'eau verte, capitale pour le monde végétal. En France, 86 % de l'eau des précipitations qui est utilisée (eau bleue et verte) sert à l'agriculture [16] [17]. La consommation d'eau bleue est à 48 % pour l'irrigation. Dans le monde, l'utilisation d'eau bleue se répartit entre 70 % pour l'irrigation, 22 % pour l'industrie et 8 % pour la consommation domestique. Cette importance relative de l'irrigation est très variable en fonction du climat et de la stratégie des pays. Par exemple, au Maroc, 48 % des prélèvements d'eau bleue sont destinés à l'irrigation, en Tunisie 80 %, en Algérie moins de 60 %, ces prélèvements sont en croissance. On estime aujourd'hui que dans certains pays, l'irrigation se fait en extrayant des aquifères des volumes d'eau supérieurs à la recharge annuelle moyenne, ce qui conduit à vider ces aquifères d'une fraction plus ou moins grande de leurs stocks, ce qui ne peut pas durer indéfiniment. Dans l'ordre décroissant d'importance, les pays concernés sont l'Inde (35 km³/an), les USA (16 km³/an), la Chine (11 km³/an), le Pakistan (18 km³/an), l'Iran (14 km³/an), le Mexique (6 km³/an). Ces chiffres proviennent pour partie de modélisations hydrologiques, et de mesures du champ de gravité réalisées depuis l'espace par le satellite US GRACE. Le total mondial de ces prélèvements sur les stocks d'eau douce serait de l'ordre de 125 km³/an soit environ 5 % de toute l'eau utilisée dans le monde pour l'irrigation (2 510 km³/an en 2000). Mais ces estimations sont très imprécises. Dans le

⁴ Ce type de travail est très important. Il n'en demeure pas moins que de tels assemblages de modèles, conduisant à des méta-modèles, posent des questions méthodologiques délicates, sachant de plus que les modèles en question, à titre « individuel », sont, en eux-mêmes, déjà difficiles d'utilisation.

monde, plus de 70 % des barrages ont l'irrigation comme vocation première (l'énergie hydroélectrique est la vocation principale de moins de 25 % des barrages). La consommation d'eau pour l'énergie est faible, même si les prélèvements sont importants. En effet, l'eau prélevée est immédiatement rejetée dans le milieu. La génération d'électricité thermique requiert une source chaude et une source froide obtenue par circulation de l'eau d'un fleuve, ou de la mer, ou en évaporant de l'eau dans des tours. Par exemple, sur le Rhône, les centrales nucléaires de Bugey et Cruas (à tours de refroidissement), plus Saint Alban, Tricastin (sans tour de refroidissement) consomment $4,5 \text{ m}^3/\text{s}$ en moyenne alors que le débit d'étiage est de l'ordre de $400 \text{ m}^3/\text{s}$. Dans certains cas, l'énergie peut entrer en compétition avec l'irrigation en saison sèche. Beaucoup de centrales électriques thermiques sont pour cette raison construites en bord de mer. L'énergie hydroélectrique ne consomme presque pas d'eau. Les lacs de retenue peuvent évaporer plus que l'espace végétal qu'ils remplacent, surtout dans les pays désertiques, ce qui fait baisser localement la température, mais la consommation d'eau est faible. La production hydroélectrique dépend du débit des fleuves, de la hauteur de chute et de la durée du volume de stockage.

La production agricole est sensible aux modifications saisonnières et interannuelles des ressources en eau et à leur évolution tendancielle, davantage pour l'agriculture pluviale que pour l'agriculture irriguée. Ces variations ont un impact sur la productivité et sur les types de culture ou d'élevage développés.

Ce que dit le GIEC

Un document de synthèse a été émis par le GIEC en juin 2008 « le changement climatique et l'eau » document technique VI du GIEC⁵ [18]. Les auteurs soulignent que l'attribution des causes des changements des précipitations mondiales n'est pas claire du fait que ces dernières sont fortement influencées par l'amplitude de la variabilité naturelle. Le sujet de l'évapotranspiration est abordé : « *il n'existe que peu de littérature sur les tendances observées en matière d'évapotranspiration réelle ou potentielle. [GT I 3.3.3] » [...] « Un résultat extrêmement fiable est que le réchauffement climatique donnerait lieu à des variations saisonnières de l'écoulement fluvial là où une grande partie des précipitations hivernales tombent actuellement sous forme de neige, avec des débits printaniers inférieurs en raison de la baisse ou de la précocité de la fonte de neige, et des débits hivernaux supérieurs. C'est notamment le cas dans les Alpes européennes, en Scandinavie et autour de la mer Baltique, en Russie, dans la chaîne de l'Himalaya ainsi que dans l'ouest, le centre et l'est de l'Amérique du Nord »*. Le rapport ne propose pas de conclusion sur la quantité de neige et les tendances perçues. En 2015, la quantité de neige a été très exceptionnellement élevée en Norvège. Le phénomène *El Niño* joue un rôle essentiel dans les oscillations climatiques à l'échelle pluriannuelle. « *Les observations disponibles jusqu'à présent ne font pas état d'un changement formellement détectable de la variabilité du phénomène ENSO (El Niño – oscillation australe, El Niño – Southern Oscillation) »*. Il est dit qu'aucune corrélation solide n'est décelée entre température et ressources hydriques.

Le résumé exécutif est plus conclusif : « *Le réchauffement observé pendant plusieurs décennies a été relié aux changements survenus dans le cycle hydrologique à grande échelle, notamment : l'augmentation de la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère, la modification de la configuration, de l'intensité et des extrêmes des précipitations, la diminution de la couverture neigeuse et la fonte des glaces accrue, ainsi que la modification de l'humidité du sol et du ruissellement. Les changements dans les précipitations sont très variables à l'échelle spatiale et d'une décennie à l'autre. Au cours du XX^e siècle, les précipitations ont surtout augmenté sur les continents dans les latitudes les plus septentrionales, tandis que des diminutions ont principalement touché les latitudes comprises entre 10°S et 30°N depuis les années 1970. La fréquence des épisodes de fortes précipitations (ou la partie des précipitations totales imputable à de fortes pluies) a augmenté dans la plupart des régions (probable).* »

⁵ 217 pages avec un résumé exécutif de 2,5 pages. Dans le groupe de travail il n'y a pas de français ni de francophone vs 7 représentants du Royaume-Uni

Les sources d'eau douce sont essentiellement la pluie et la neige. Leur volume dépend d'éléments très complexes dont, entre autres, la température. Les modèles physiques sont loin d'être robustes. Les observations sont peu démonstratives. Que peut-on conclure, sinon que l'effort doit porter sur l'amélioration de modèle afin de réduire les incertitudes ?

De multiples études régionales ou nationales sont effectuées à l'occasion des nombreux grands projets de transferts d'eau, par exemple au Maghreb.

Au Maroc, les rapports réalisés à la demande du ministère en charge de l'eau « Projet 2015 » de transfert d'eau Nord-Sud reprennent les données hydrauliques sur des séquences qui débutent en 1915 pour la pluviométrie et en 1939 pour les mesures de débit des grands fleuves. Aucune tendance n'est perceptible pour les débits. Une tendance est visible pour la pluviométrie à Tanger, mais l'industrialisation de la région peut avoir une influence sur la mesure. Les cycles sont bien visibles. Le rapport indique que l'on ne voit pas d'influence de la température sur les ressources hydriques et que l'on ne connaît pas l'évolution de l'évapotranspiration avec la température. On note que plus le climat est aride, moins il y a de corrélations. Les modèles de prévision de provenances variées indiquent des résultats qui varient de 20 % à 160 % des valeurs actuelles.

Des études ont été publiées [19] [20] sur les variations interannuelles des débits de grands fleuves tropicaux, le Congo, l'Oubangui, la Sangha, l'Amazonie, l'Orénoque. Il n'y a pas de tendance perceptible et les chercheurs ne voient pas d'influence directe du climat. En revanche, les conséquences de l'augmentation du niveau des mers sur les débits estuariens pourraient conduire à des modifications en amont, par exemple sur des systèmes peu pentus comme l'Amazonie.

Le fait que l'on ne décèle pas de tendance évolutive des ressources hydriques, ni de corrélation entre la température et les ressources hydriques ne permet pas de conclure. Il n'y a pas de vraisemblance à supposer que le futur sera pire en tout lieu comme si nous étions aujourd'hui dans un état d'optimum global exceptionnel. Le phénomène est tellement complexe et tellement dépendant des particularités climatiques de chaque région que les modèles ne permettent pas pour l'instant de faire des prévisions vraiment crédibles et cela d'autant plus qu'il n'y a que peu de mesures de calage, ni d'explications physiques complètes structurées de changements encore imperceptibles ou seulement perceptibles par des signaux très faibles. Pour la France, Météo-France ne distingue pas d'évolution des précipitations moyennes alors qu'elle mesure clairement l'augmentation des températures. Comme, par ailleurs, les prélèvements dans les fleuves et les nappes ont tendance à augmenter, la mesure d'une tendance à l'intérieur des variations météorologiques est réellement difficile. Les difficultés rencontrées pour tirer un bilan clair devraient nous inciter à approfondir la question, y compris dans les aspects mathématiques des modèles (instabilité, bifurcation etc.).

Dans son histoire du climat [21], Emmanuel Le Roy-Ladurie nomme Petit optimum médiéval la période relativement chaude en Europe de l'Ouest de 800 à 1300 qui semble correspondre plus ou moins au climat d'aujourd'hui. C'était une période plutôt favorable aux agriculteurs et aux consommateurs, même si la sécheresse était le « fait dangereux » de la zone méditerranéenne. Dans le reste de la France, l'excès d'humidité et le gel excessif étaient plus dommageables comme il le montre pour le Petit âge glaciaire (jusqu'en 1860). Nous n'avons pas d'archives historiques concernant des évolutions des températures moyennes au-delà de plus ou moins 1 °C. En revanche, les archives paléontologiques (donc antérieures à la période historique) nous renseignent à ce sujet, par exemple on évalue une température de +12 °C par rapport à l'actuel au milieu de l'Éocène [22].

Un autre aspect de la question concerne l'impact de la température et des variations de ressources en eau sur la production agricole et, notamment, vivrière. Si la température augmente, le cycle végétatif se raccourcit ; plus il fait chaud, plus le temps passe vite pour la plante, jusqu'à une limite supérieure de 32-34 °C au-delà de laquelle la plante ne peut plus s'adapter. Il n'y a pas d'optimum de température. Les espèces et les variétés

sont sélectionnées pour optimiser la production en fonction du climat local. Le monde agricole adapte sa pratique et ses sélections de production en fonction du climat, à l'intérieur de la variabilité qu'il a expérimentée. Par exemple, les catégories de précocité sont adaptées à la latitude. Pour les arbres, surtout à croissance lente, l'adaptation est plus longue et peu avoir un coût pour les forestiers. Le monde agricole même traditionnel est dynamique et s'adapte en permanence.

Recommandations

Les incertitudes demeurent importantes, même si l'augmentation de température tend à intensifier le cycle hydrologique on éprouve encore des difficultés à en prévoir les conséquences. Les recommandations d'action identifiées sont :

- *d'améliorer les modèles et leur utilisation. Celle-ci doit être raisonnable et... raisonnée⁶. On voit aussi que l'étude du passé aux échelles historiques, préhistoriques, et paléontologiques⁷ devrait être mieux prise en compte et même développée, au moins dans ce contexte. Ces travaux devraient concerner les variations climatiques et leurs effets. En plus, pour la période historique, l'histoire des techniques de gestion de l'eau, des pratiques et des produits agricoles.*
 - *de privilégier la recherche de progrès technologique améliorant la gestion des systèmes hydrologiques, plus généralement de la ressource en eau, stockage y compris, et des milieux fluviaux et lacustres. Lorsque des travaux d'hydrauliques doivent être réalisés pour s'adapter à un changement climatique (barrage, canaux de transferts à longue distance, alimentation de nappe...) il faut les planifier dans le temps et imaginer des schémas d'infrastructures suffisamment adaptables pour qu'ils gardent leur pertinence dans un climat qui évolue.*
-

Mers et océans

Rappelons d'abord que le milieu marin couvre 71 % de la surface terrestre⁸ et joue un rôle de premier plan dans la dynamique du climat, par exemple comme réservoir thermique, comme régulateur, grâce en particulier à la circulation thermohaline [cf. figure 2.2.] ou encore via les déplacements plus ou moins périodiques des grandes masses d'eau (oscillations océaniques ENSO ou NAO, oscillation nord-atlantique, *North Atlantic Oscillation*). Son observation sur le long terme est primordiale. Les possibilités d'action sont limitées.

⁶ C'était l'un des objets majeurs de la synthèse du GIEC (2008, 2014) et de l'article antérieur « Environnement : modélisation et modèles pour comprendre, agir et décider dans un contexte interdisciplinaire », publié en 2002 [23].

⁷ On conviendra que l'échelle historique correspond au passé pour lequel on dispose d'archives écrites, l'échelle préhistorique inclut les archives d'autres natures et enfin l'échelle paléontologique prend en compte les archives antérieures aux sociétés humaines.

⁸ La surface de la planète est de 510 millions de km² (100 %), celle des océans est de 362 millions de km² (71 %) et celle des continents est de 148 millions de km² (29 %). Soulignons pour l'océan qu'il faut tenir compte de la « 3^e dimension » !

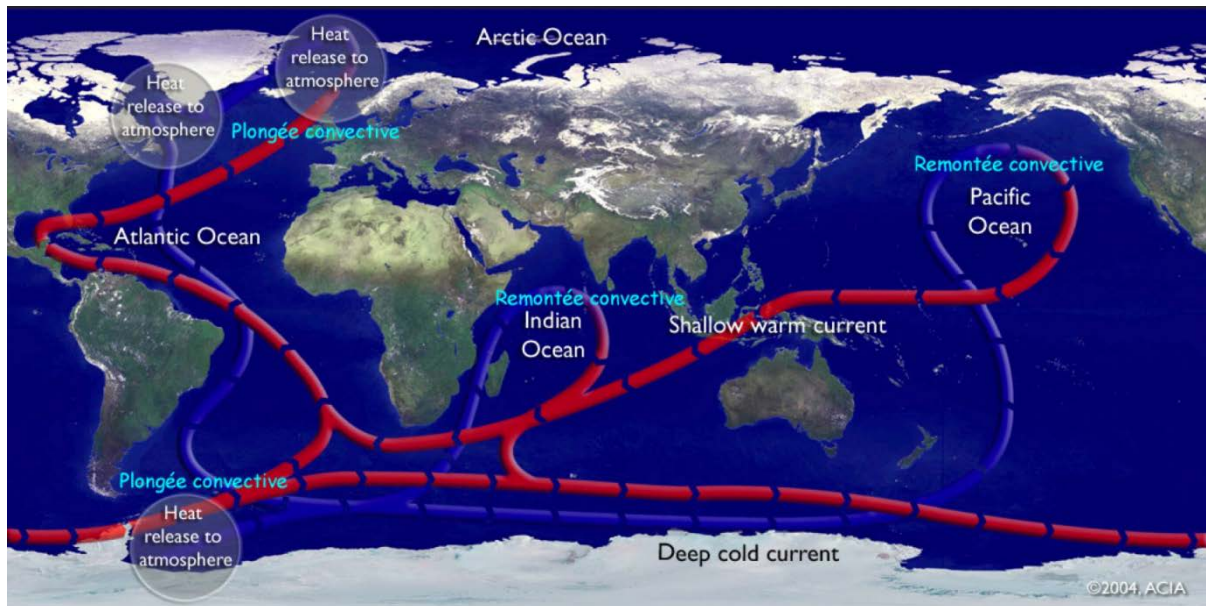


Figure 2.2. Circulation thermohaline

http://accres.ens-lyon.fr/accres/terre/paleo/systemclim/gulf-stream/pages_gulfstream/dosscientif/descriptgulfstream/circuthermohal/circuthermohalhtm

Les effets des changements climatiques seront sensibles au niveau marin avec des conséquences marquées sur les littoraux, continentaux ou insulaires. Globalement les effets du réchauffement et des changements climatiques sur l'océan sont les suivants :

- le niveau de la mer s'élève (+ 20 cm/1900-2000, +3,2 mm/an 2015, 29 cm à 98 cm à l'horizon 2100). Cette hausse reste modeste à l'échelle historique et préhistorique (+ 60 m depuis 10 000 ans) mais elle est significative à l'échelle de quelques générations. L'origine en est la fonte des glaces continentales, la dilatation thermique de l'eau de mer et en moindre mesure les mouvements de la croûte terrestre ;
- les océans absorbent entre 25 % et 30 % des émissions anthropogéniques de CO_2 ⁹ avec des capacités d'absorption variables et dépendant de leur température, les eaux froides étant les plus absorbantes. Cela conduit à une « acidification » des océans avec une diminution du pH ;
- cette absorption dépend de deux processus distincts : d'une part, la dissolution du CO_2 dans l'eau et, d'autre part, la fixation de CO_2 par le phytoplancton (photosynthèse), une part importante sédimente et participe ainsi à une énorme captation de carbone à très long terme, à savoir à l'échelle géologique ;
- les océans absorbent 93 % de l'excès de chaleur, ce qui en fait un élément majeur du bilan thermique global de la planète ;
- les dynamiques hydrologiques peuvent être modifiées : les courants marins, la distribution et les mouvements des masses d'eau peuvent être perturbés par l'apport localisé d'eaux de fonte ou par des phénomènes météo du type *El Niño*, *La Niña*, ou l'oscillation nord-atlantique.

⁹ Pour fixer les idées, les données les plus récentes donnent les bilans suivants pour la période 2003-2013 : $E_{FF} = 8.6 \pm 0.4 \text{ GtC an}^{-1}$, $E_{LUC} = 0.8 \pm 0.5 \text{ GtC an}^{-1}$, $G_{ATM} = 4.3 \pm 0.1 \text{ GtC an}^{-1}$, $S_{OCEAN} = 2.6 \pm 0.5 \text{ GtC an}^{-1}$, and $S_{LAND} = 2.6 \pm 0.8 \text{ GtC an}^{-1}$ [Selon Le Quéré *et al.*, Global carbon budget 2013 [24]].

E_{FF} : émissions combustion des carburants d'origines fossiles et industrie du ciment, E_{LUC} : changement d'utilisation des terres, G_{ATM} : accroissement atmosphérique, S_{OCEAN} : absorption par les océans, and S_{LAND} : absorption par les écosystèmes terrestres. Émissions anthropogéniques = $E_{FF} + E_{LUC}$.

Ces changements, en particulier ceux des paramètres physico-chimiques (augmentation de la température et diminution du pH, modification de la teneur en oxygène) vont diminuer le potentiel de dissolution du CO₂ mais auront également des effets sur les systèmes vivants marins. En particulier, la modification de l'équilibre calco-carbonique rend plus difficile la fabrication de coquilles calcaires et la stratification thermique accrue des océans diminuera les apports d'éléments nutritifs nécessaires au phytoplancton. Par ailleurs, ils peuvent conduire à des migrations de certaines populations (la plupart des organismes marins sont poïkilothermes, donc sensibles aux variations de températures).

Le GIEC présentant une augmentation des événements extrêmes, d'autres effets sont envisageables, comme des tempêtes plus violentes mais ils ne semblent pas être documentés. Ils ne sont donc pas considérés ici. À noter que, mondialement, le nombre de zones d'anoxie (ou zones mortes), où le vivant dépendant de l'oxygène disparaît, est en augmentation. Cela pourrait également être lié aux changements climatiques, mais ce lien nécessite d'être validé.

La France est particulièrement concernée à cause de son vaste domaine marin : elle contrôle en effet la deuxième zone économique exclusive (ZEE) du monde avec ses 11 millions de km²¹⁰. Cela lui permet de bénéficier d'évidentes opportunités économiques, mais lui confère également une responsabilité politique, celle de contribuer à l'amélioration des connaissances de ces effets sur les océans et le milieu marin. Il faut insister sur l'attention à porter aux aspects métrologiques utilisant des moyens spatiaux (satellites munis des capteurs adéquats) ou de surface (stations marines, bouées fixes et dérivantes, moyens navigants), ainsi que sur la nécessaire amplification des efforts de modélisation des aspects physico-chimiques, mais aussi des évolutions des systèmes vivants en particulier des ressources halieutiques. Il est à noter que sur ces sujets la France dispose avec sa structure MERCATOR-Océan¹¹ d'un outil particulièrement adapté d'analyse et de prévision des conditions océaniques, hauturières et côtières.

Impacts sur le littoral et les terres basses

Les impacts des évolutions des océans sur les zones littorales et sur les terres basses sont à suivre de près en raison de l'importance de la longueur du littoral français¹². Le littoral étant compris ici comme incluant la bande marine côtière et la bande terrestre côtière de part et d'autre de la limite terre - eau.

Simultanément, on observe une densification du peuplement du littoral (doublement des surfaces bâties entre 1960 et 1990). Ces convergences contradictoires entre dynamiques naturelles et dynamiques socio-économiques provoquent une augmentation des risques associés, mais aussi des opportunités en termes d'innovations (notamment en termes d'architecture et d'urbanisme) [25].

Les changements des océans identifiés ci-dessus ont de multiples impacts (observés ou prévisibles) sur le littoral :

- la modification du trait de côte en particulier en raison de l'élévation de la mer (et, peut-être, de phénomènes météorologiques plus extrêmes) (on estime qu'aujourd'hui 24 % du linéaire des côtes françaises est en cours d'érosion, cela pourrait s'accroître) ;

¹⁰ À titre de comparaison, la ZEE de l'ensemble des pays de l'Union européenne est de 26,6 millions de km², dont 6,8 millions de km² pour le Royaume-Uni.

¹¹ MERCATOR Océan est une société rassemblant les grands acteurs nationaux de l'océanographie. Cette société est aujourd'hui déléataire de la Commission Européenne pour la gestion du service marin dans le cadre de son programme COPERNICUS. "MERCATOR Océan" développe ce qu'il est possible d'appeler, en bref, la météorologie de l'océan (<http://www.mercator-ocean.fr/fre/>)

¹² La longueur des côtes est de l'ordre de 5 000 km pour la France métropolitaine et de 15 000 km avec l'outre-mer. La géométrie du trait de côte étant fractale, la longueur du trait de côte dépend de l'échelle choisie. Nous avons retenu les données fournies par le Service hydrographique et océanographique de la marine (SHOM). <http://www.shom.fr/les-activites/projets/delimitations-maritimes/espaces-francais/>

- des submersions d'îles basses (les atolls des Tuamotu par exemple) ou d'espaces précédemment hors d'atteinte de la mer, en particulier dans les estuaires ;
- des salinisations des eaux souterraines côtières entraînant une diminution des ressources en eau douce ;
- des difficultés d'évacuation en mer des eaux douces des fleuves en cas de crue (avec des retentissements sur les cours d'eau en amont), ou des eaux pluviales côtières en cas de pluies exceptionnelles ;
- des effets sur les ressources marines vivantes avec la migration des populations halieutiques, et donc sur la pêche, avec des conséquences sur l'aquaculture côtière et la conchyliculture.

Les systèmes hydrologiques continentaux sont approvisionnés par les précipitations, leurs modifications jouent sur le littoral : modification du trait de côte par l'apport du sédiment ou, à l'inverse érosion et augmentation des risques d'inondation ou de submersion.

Ainsi, les activités et les aménagements côtiers sont directement concernés. C'est l'élévation du niveau de la mer qui est la cause de la majeure partie des impacts répertoriés ci-dessus. Dans bien des cas, les mesures défensives visant à conserver le *statu quo* seront dérisoires. Les zones côtières vont devoir s'adapter : protection des biens et des personnes, poldérisation, habitat et tourisme, zones portuaires, zones d'estuaires, pérennité des infrastructures vitales, gestion des différentes eaux douces, etc. Tous les aménagements côtiers dont la durée de vie attendue est de plusieurs décennies, en particulier la plupart des constructions, vont devoir prendre en compte le niveau de la mer envisageable à l'horizon de cette durée de vie.

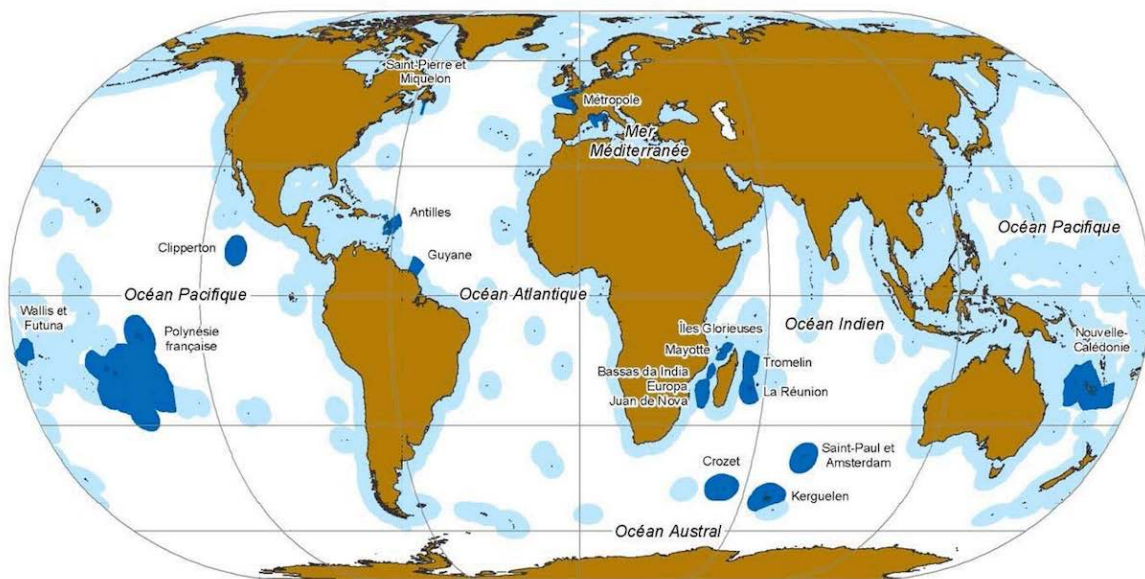


Figure 2.3. ZEE française <http://www.senat.fr/rap/r11-674/r11-67411.html>

Cela étant, la variabilité naturelle à plusieurs échelles de temps et d'espace reste importante et limite les possibilités de prédiction. Son estimation devrait être une priorité. De plus, les capacités prédictives des modèles sont elles aussi limitées et devraient être améliorées. Les mesures d'adaptation relèvent de plusieurs ordres, politique, juridique, gestionnaire et technologique. Rappelons d'abord qu'en France, le rivage est un espace public pour l'essentiel, depuis l'édit royal de 1584. La gestion du littoral est dévolue pour une

grande part à des établissements publics, notamment le Conservatoire du littoral, l'activité de pêche et de production de ressources vivantes et non vivantes est réglementée depuis longtemps au niveau national et international. La création des zones économiques exclusives [Convention des Nations unies sur le droit de la mer, dite de Montego Bay, signée le 10 décembre 1982 [26]] laisse aux États concernés une grande responsabilité dans la gestion de ces espaces et des ressources qu'ils contiennent.

Les technologies d'adaptation et d'atténuation

Les besoins d'adaptation aux effets ci-dessus stimulent de nombreuses réponses technologiques. De nouveaux types d'aménagements côtiers « *on & offshore* », et même sous-marins, sont envisagés ou déjà en cours. Pour l'habitat, ils relèvent notamment de l'architecture et de l'urbanisme. Les moyens navigants professionnels et récréatifs, ainsi que les aménagements afférents vont évoluer, par exemple par une meilleure utilisation des courants aériens et marins. Les écosystèmes littoraux, naturels ou artificiels, terrestres ou maritimes, font déjà l'objet de grandes attentions, notamment parce qu'ils peuvent assurer une certaine résilience, comme c'est le cas des mangroves, et aussi un développement des ressources marines. En certains endroits, la salinisation des nappes souterraines côtières est combattue par des réinjections d'eaux douces après usage. Des modèles prévisionnels permettent de prendre en compte simultanément les variations des hauteurs de la mer et les particularités des événements pluvieux pour agir en temps réel sur les réseaux d'évacuation des eaux pluviales. Dans certains estuaires (Pays-Bas, Tokyo), des portes mobiles permettent d'empêcher les plus hautes marées d'envahir les terres.

Les océans sont des ressources énergétiques que l'on peut capter avec des technologies sans impact CO₂. La production d'énergie dans l'espace maritime va devenir de plus en plus importante avec des installations marémotrices, hydroliennes et éoliennes.

Recommandations

Les discussions au sein de l'Académie des technologies ont permis d'identifier les recommandations d'action suivantes :

- *renforcer les moyens d'observation océanographiques (Flotte Océanographique Française), spatiales et terrestres ;*
- *étant donné l'ampleur et la diversité du domaine maritime, des responsabilités afférentes, des ressources qu'il contient, des compétences déjà existantes, soutenir fermement un effort d'innovations de développements technologiques à la mesure de cette importance ;*
- *innover et investir en matière d'instrumentation et de modélisation ;*
- *instaurer, par l'État, la prise en compte d'une carte de l'élévation progressive du niveau de la mer, (à l'instar de la réglementation sismique) pour aider les aménagements et les constructions en zones côtières ;*
- *créer dans les villes côtières des schémas directeurs d'évacuation des eaux pluviales urbaines ;*
- *introduire le risque d'érosion du rivage et celui de hausse du niveau de la mer dans les Plans de prévention des risques d'inondation (PPRI) des communes littorales ;*
- *mieux comprendre et évaluer les impacts sur l'aquaculture et plus généralement sur la ressource halieutique.*

Enfin, il est utile de percevoir les changements ci-dessus en ne nous figeant pas sur les risques, mais aussi en termes d'opportunités avec autant d'occasions de progrès scientifiques, technologiques et économiques, ainsi que d'amélioration des conditions de vie des sociétés humaines. On peut penser à l'architecture adaptée, aux aménagements urbains offshore, à la production d'énergie à partir de sources marines (courants et marées), à la poldérisation, au développement de l'aquaculture, etc. Il est aussi important de replacer les dynamiques actuelles dans un contexte historique et paléontologique. De plus, les connaissances acquises à ce propos pourraient permettre d'utiliser les modèles en faisant des « rétro-calculs » et de là vérifier leurs capacités à « prévoir le passé » et, plus généralement, leurs performances.

BÂTIMENT, URBANISME, MOBILITÉ, TRANSPORT

Cet ensemble de domaines est aujourd'hui un des principaux responsables des émissions de gaz à effet de serre. Sa contribution relative va continuer à augmenter rapidement en raison de la tendance lourde mondiale à l'urbanisation.

Pourquoi traiter dans un même groupe l'espace bâti et la mobilité ? Pour la simple raison qu'ils sont en interaction forte : une bonne répartition des concentrations urbaines, une bonne organisation interne des agglomérations a des répercussions importantes sur les besoins de mobilité et de transport. Réciproquement, une architecture de transports (passagers et marchandises) a une influence considérable sur le développement harmonieux ou non du tissu urbain.

Évolutions tendancielles

Ce paragraphe est un rappel rapide de faits bien connus et bien documentés.

a / Dans le champ économique et social

- La population mondiale est en forte croissance, la stabilisation de la population mondiale n'est pas attendue avant une cinquantaine d'années à un niveau sans doute voisin de dix milliards d'humains. On s'attend à ce que ce soit l'Afrique qui ait le plus fort taux de croissance.
- À cet accroissement de la population s'ajoute un flux migratoire très important des campagnes vers les villes et, donc, un taux d'urbanisation croissant. Mal gérée cette urbanisation conduit à des déséquilibres considérables : consommation d'espace accrue liée à l'étalement urbain et à l'occupation anarchique du périurbain, crises économiques à répétition, inégalités croissantes des revenus.

Ce phénomène d'urbanisation mal maîtrisé génère nombre d'effets délétères :

- accélération des émissions de gaz à effet de serre (GES) ;
- tensions sur les ressources (foncier, matières premières, énergies) ;
- détérioration de la qualité de l'air en milieu urbain et des conditions d'accès à l'eau potable, à des conditions de vie hygiéniques, avec des conséquences sur la santé.

Les conséquences de l'évolution galopante de ce domaine sont souvent sous-estimées par les planificateurs du développement urbain, alors que sans être la panacée il peut faciliter l'amélioration des conditions de vie urbaine et l'efficacité globale de la cité, y compris en matière de sobriété énergétique.

Très globalement, la diffusion rapide d'Internet et des technologies mobiles IP, joue et va jouer de plus en plus un rôle essentiel dans la mise en place de nouveaux services et de nouvelles pratiques de consommation et ceci y compris dans les grandes concentrations urbaines des pays émergents.

b/ Dans le domaine des transports et de la mobilité

Les disparités interrégionales sont tout aussi importantes que dans le domaine du développement urbain.

Pays en développement

- L'accessibilité aux moyens de transport en commun, même dans les grandes agglomérations est faible et disparate ;
- le taux de pénétration automobile est en forte croissance partout où les revenus *per capita* augmentent ;

- malgré une volonté très souvent affirmée, les équipements en réseaux de transports collectifs n'arrivent pas à suivre le rythme de développement des grandes agglomérations ;
- d'où le foisonnement du transport informel et l'émergence de nouveaux services.

Pays développés

La situation évolue aussi assez rapidement. Deux grands modèles urbains coexistent selon les régions du monde : ville dense et ville étalée. Les deux modèles sont loin d'atteindre à une efficacité énergétique correcte non plus qu'à la satisfaction de leurs habitants...

- partout il y a congestion des voies urbaines ;
- partout aussi il y a congestion et dysfonctionnements des transports collectifs urbains ;
- dans un modèle comme dans l'autre, le budget transport pèse sur les entreprises comme sur les ménages ;
- dans les pays les plus développés on assiste à un certain renouveau des modes de transport « doux » : marche, deux roues (vélos ou motorisés) ;
- la réduction de la demande de mobilité grâce au télétravail et au « coworking » se développe ;
- autre développement intéressant : celui de la mobilité collaborative.

Pays émergents

Leurs grandes agglomérations sont dans une situation intermédiaire, mais pas toujours enviable (que l'on pense à Pékin...).

c/ Dans le champ de la construction

L'exemple des pays les plus avancés, dont la France, peut-il faire école ?

La construction neuve

Des progrès spectaculaires dans les matériaux et dans la conception architecturale des locaux ont été faits ces deux dernières décennies, ouvrant des perspectives spectaculaires de réduction de GES, mais avec seulement 1 % du bâti renouvelé par an (350 000 nouveaux logements construits en France en 2014), l'impact sur la réduction des facteurs induisant le changement climatique est trop décalé par rapport au besoin affirmé et aux engagements pris. Dans ce domaine du bâti « vertueux », les entreprises françaises sont en concurrence avec celles d'autres pays comme l'Allemagne, mais néanmoins bien placées et elles peuvent espérer bénéficier des retombées de « démonstrateurs » de bâtiments et de quartiers, pour se positionner sur ces marchés, notamment à l'étranger et en ouvrant aussi des perspectives transposables à l'ensemble du bâti. Il conviendrait de soutenir la dynamique de l'Institut de la ville durable qui vise à faciliter l'émergence de quartiers durables, vitrines du savoir-faire français, portés par des consortiums publics/privés.

Il s'agit notamment de la réalisation et des services associés dans :

- la construction de bâtiments à énergie positive, mais aussi à usages mixtes (commerces, bureaux, logements) pour faciliter la mutualisation des ressources (énergies, espaces de parking...) et des usages ;
- l'aménagement de quartiers neufs : quartier numérique, quartier à haute performance énergétique, mutualisation des ressources, interopérabilité de la mobilité, services de proximité, internet des actifs du quartier ;
- le stockage de l'énergie à l'échelon des habitations et des quartiers : pour l'électricité, utilisation des batteries de voitures en seconde vie ; pour la chaleur, géothermie, stockage intersaison.

Par ailleurs, le développement de la filière bois pour la construction neuve, dont les blocages restent à résoudre, présente un double avantage : gestion des GES car le bois est un puits de carbone ; diminution du coût de la construction car la construction bois est facilement industrialisable.

La rénovation du bâti

Le renouvellement ne permettant pas d'atteindre un rythme de réduction de la consommation énergétique du bâti cohérent avec le besoin de la lutte contre le réchauffement climatique, il est indispensable de s'intéresser à la rénovation de l'ancien.

Les défis sont multiples : financiers, organisationnels et comportementaux, mais grâce aux progrès technologiques, des solutions mieux adaptées apparaissent. On retiendra, par exemple, l'électronique de commande pour réduire le chauffage des logements ; l'isolation renforcée et le remplacement des vitrages ; les progrès en matière de photovoltaïque ouvrent aussi de nouvelles perspectives : cellules dans les vitrages verticaux, inclusion dans les revêtements de chaussées. Dans un domaine très différent les progrès en matière de réseaux de chaleur permettent d'envisager d'accroître significativement leur déploiement.

d/ La ville insérée dans son voisinage proche et plus lointain (l'inter-cité et l'environnement rural)

L'approche strictement urbaine (allant des centres économiques et culturels aux périphéries les plus résidentielles), demande déjà une approche systémique, à plus forte raison lorsque l'on agrandit encore l'échelle.

La ville proche du monde

Élément de son rayonnement et de la qualité de vie, la ville déploie des voies de communication (ferroviaires, routières, aériennes, maritimes et fluviales) ou virtuelles, essentielles aux transports des personnes et des produits (à exporter ou à acheminer au plus près des habitations) ainsi que des biens immatériels.

La ville et son environnement

Au sein de chaque région, la ville vit en symbiose avec son environnement, elle est un réservoir de services (éducation, culture, santé, loisirs, etc.) à la disposition des ruraux voisins. Avec le milieu rural environnant, une offre suffisante de transports collectifs devient la contrepartie d'un droit de regard sur les permis de construire qui protège la production agricole et la qualité paysagère de l'environnement.

Comment surmonter les difficultés ?

L'approche systémique

Nécessité de l'approche systémique combinée de l'urbanisme, de la mobilité, de l'organisation sociale, etc.

En France et en dépit d'un mix électrique très favorable, le bâtiment, l'urbanisme, la mobilité et les transports sont responsables de plus de 50 % des émissions nationales de GES, contre 45 % en moyenne mondiale. Ceci souligne la nécessité d'une approche globale pour atteindre les niveaux d'émission auxquels nous nous sommes engagés, tout en préservant au mieux la qualité de vie – et même si possible en l'améliorant, particulièrement pour les habitants des grandes agglomérations – et en préservant la compétitivité de nos entreprises. Hors d'une telle approche, il reste peu d'espoir que nous puissions maîtriser, pour notre quote-part, les émissions de GES et contribuer à hauteur de ce qui serait nécessaire à la limitation du réchauffement climatique à + 2 °C : il faudrait réduire de l'ordre de 50 % la contribution du bâti aux émissions de GES autour de 2050, ce qui paraît hors d'atteinte en dépit des performances spectaculaires dans les constructions neuves, sauf révolution dans le rythme de rénovation d'un parc déjà construit à plus de 70 % et qui bute aujourd'hui sur des obstacles financiers, organisationnels et comportementaux, laissant les défis technologiques au second plan. Du côté des transports motorisés, l'allègement des véhicules, l'amélioration du rendement des moteurs

thermiques, l'arrivée de la motorisation électrique qui permet aussi le stockage de l'énergie, la connectivité internet et la diversification de l'offre des transports collectifs rendent réaliste la réduction de 27 % à 14 % des émissions de GES. En clair, quelles que soient les avancées en matière de réduction des GES sur le bâti et sur la mobilité, on n'obtiendra les résultats escomptés qu'au prix d'une véritable politique d'urbanisation intégrant très tôt ces enjeux énergétiques.

Une vision politique cohérente et globale

Une coordination bien conduite sur tous les leviers dont dispose une politique urbaine – ou interurbaine – déterminée et maîtrisée dans la durée n'est pas hors de portée !

La ville n'est pas une simple juxtaposition de constructions et de déplacements : elle est un système complexe de logements, d'emplois, de producteurs de biens et de services, dont la fonction première est de démultiplier les échanges pour mieux répondre aux attentes de chacun. Les choix urbanistiques, l'allocation des espaces, la fluidité des voies de communication, le recours systématique au virtuel en lieu et place des déplacements contraints, le tout pensé comme un tout bien coordonné, deviennent des moyens d'enrayer une course perdue d'avance contre ce qui serait autrement l'explosion de la mobilité non choisie. Autrement dit, ce qui semble hors de portée du bâti ou des transports pris isolément devient moins inaccessible en conjuguant les améliorations attendues de l'urbanisme et de son incidence sur les déplacements contraints. Pour optimiser « l'écosystème urbain », il est nécessaire de penser et travailler aux différentes échelles (les quartiers, y compris les faubourgs et la périphérie, la ville elle-même et, de plus en plus souvent dans le monde, les très grandes villes et les méga-cités) voire, pour éviter l'accumulation de problèmes insolubles tant financièrement que techniquement au-delà d'un certain niveau de gigantisme, de penser l'aménagement d'un ensemble territorial plus vaste au niveau de l'État, voire d'un espace géographique encore plus vaste dans les zones où dominant de petits États fortement peuplés. Pour chacune de ces catégories, il paraît utile de mettre en place des opérations pilotes ayant force démonstrative afin de mieux comprendre les besoins et les problèmes spécifiques à chaque échelle et de définir des lignes politiques adaptées à ces échelles et maintenues dans la durée. L'échelle de l'urbanisme est une échelle longue (nous vivons encore à Paris, par exemple, largement sur un parcellaire multiséculaire, partout, même si on ne construit plus « pour l'éternité » on construit quand même pour une centaine d'années, les grandes infrastructures sont destinées à durer encore plus longtemps : la construction des chemins de fer a commencé en Angleterre en 1830, le métro parisien date pour une grande part du début du XXe siècle, tout laisse à penser que la ligne 1 sera encore utilisée au début du XXIe siècle et elle a participé à la structuration de l'espace urbain parisien...

Recommandations

- *Élaborer des solutions globales adaptées à tous types de villes ; rechercher la diversification de l'offre de mobilité (transports collectifs, véhicules particuliers, poids lourds) et la mutualisation des modes de transport (dont intermodalité) ; développer les services de proximité économes en déplacement.*
 - *Exploiter les technologies numériques pour la ville : services, activités productives et commerce, éducation, santé etc. notamment pour recycler ou stocker l'énergie et réduire les déplacements contraints (notamment par la redistribution des activités et le télétravail).*
 - *Établir le bilan et les perspectives de la motorisation électrique : mobilité/stockage d'énergie/connectivité, et penser le véhicule comme un service.*
 - *Structurer l'offre des professionnels en matière de nouvelles technologies associées aux améliorations énergétiques, et accélérer leur formation.*
 - *Relancer la filière de construction fondée sur le bois.*
 - *Lever les blocages réglementaires qui interdisent le déploiement de nouveaux services urbains : création du statut d'auto-producteur d'énergie, mutualisation énergétique entre bâtiments, gestion de bâtiment multi-usages à énergie positive, usage de véhicules autonomes.*
 - *Réduire les délais administratifs au lancement effectif de la construction des infrastructures publiques.*
 - *Transposer vers l'ensemble du bâti les avancées démontrées dans la construction neuve ; développer les échanges d'énergie et de chaleur.*
 - *Limiter les accès au centre-ville des véhicules privés ; optimiser le stationnement de surface ; mieux gérer la logistique du dernier kilomètre.*
 - *Soutenir la dynamique de l'Institut de la ville durable.*
-

ÉNERGIE

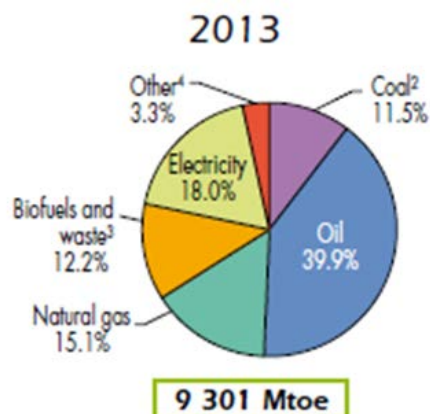
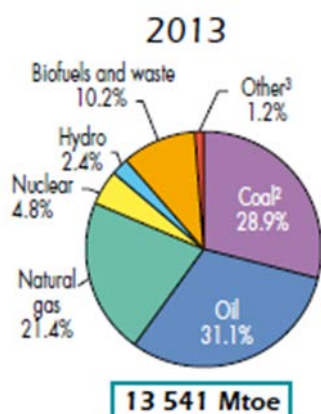
Le thème de l'énergie est traité dans plusieurs chapitres de ce document essentiellement sous la forme de ses usages. Mais les émissions de gaz à effet de serre (GES) dues à l'énergie se manifestent aussi aux stades de sa production et de sa transformation. L'ensemble des transformations énergétiques sources de CO₂ constitue plus des deux tiers des émissions de CO₂.

Ce chapitre sera consacré à un examen transversal des problématiques énergétiques face aux émissions de GES. Après un examen rapide de la demande énergétique déjà abordée dans d'autres chapitres traitant des usages, seront examinés des thèmes transversaux tels que les ressources et la production d'énergie, l'électricité, les énergies renouvelables et les conditions de leur diffusion dans le système énergétique.

Rappel sur la structuration des flux énergétiques des activités humaines

Pour clarifier la complexité du système énergétique, il est utile de rappeler que le schéma énergétique peut se structurer en trois parties :

- les énergies primaires : charbon, pétrole, gaz, nucléaire, hydraulique, soleil, vent, courant marin, géothermie... pour ne citer que les plus importants ;
- les vecteurs, c'est-à-dire la mise à disposition de l'énergie au consommateur final : fuels et carburants liquides, gaz, électricité, chaleur, hydrogène ;
- les usages : chauffages, transports, machines, dans des secteurs divers, domestique, commercial, administratif, industrie, agriculture, tourisme...



Graphes extraits du site internet de l'EIA 2015 « key world energy statistics » [39]
 (à gauche : énergie primaire, à droite : énergie consommée)

Dans beaucoup de ces transformations énergétiques, il y a émissions de GES essentiellement du CO₂.

Le vecteur électrique est le plus important en quantité d'énergie échangée. Il sera traité ci-dessous dans une partie spécifique.

Le développement d'un vecteur Hydrogène n'est pour l'instant qu'à l'état d'hypothèse, mais qui repose sur un réseau industriel réel d'échange d'Hydrogène entre sites de raffinage et de pétrochimie dans le nord de la France.

En revanche, les réseaux de chaleur, avec les progrès technologiques en isolation thermique, sont une des pistes prometteuses, non seulement avec la géothermie, mais aussi en utilisation des chaleurs fatales des eaux résiduelles comme celles des centrales nucléaires.

La demande pour les nombreux usages de l'énergie

L'aval tire les consommations d'énergie. Il faut donc examiner attentivement tous ces usages et favoriser les actions qui diminueront l'énergie nécessaire pour remplir correctement tous les besoins avec le même niveau de confort, d'efficacité et de qualité.

Les axes de progrès à explorer et les actions à entreprendre dans cette orientation dite d'atténuation ont été discutés dans les chapitres précédents, essentiellement celui consacré à l'habitat et à la mobilité. Notons que ces actions ne sont pas seulement technologiques, mais aussi organisationnelles.

Rappelons aussi que pour évaluer la contribution de la technologie il est indispensable de prendre en compte sa grande inertie : le *turnover* dans le secteur immobilier est de l'ordre de 100 ans et la durée de vie des centrales électriques est en moyenne de 50 ans. Cette inertie est illustrée par les projections de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) qui souligne que la part des énergies fossiles dans le mix énergétique devrait rester prépondérante, ne baissant que de 81 % en 1990 à 74 % en 2040. Ce secteur est aussi très capitalistique et nécessite la mobilisation d'investissements considérables.

Les ressources et les énergies primaires

Les énergies primaires carbonées, charbon, pétrole et gaz, représentent 53 % de l'énergie totale utilisée en France. Au niveau mondial, c'est plus de 75 % ; différence qui s'explique par la part importante du nucléaire en France. Leurs trois principaux usages sont la production de chaleur (chauffage bâtiments, voir chapitre III), les moteurs thermiques, (voir chapitre III, mobilité et transports), la production d'électricité (qui sera traitée ci-dessous).

Notons aussi les émissions de GES lors de l'extraction, le raffinage et la distribution (torchères, fuites de CH₄...).

Au stade exploratoire pour diminuer les émissions CO₂ des industries les plus émettrices (ciment, NH₃, sidérurgie...), le captage/stockage du CO₂ (*Carbon Capture and Storage*, CCS) est considéré depuis 15 ans comme une technologie incontournable. Les briques technologiques sont maîtrisées par l'industrie pétrolière. Les efforts technologiques doivent porter sur la réduction des coûts et l'amélioration des rendements, sur l'acceptabilité sociale des stockages on shore et la sécurité des stockages sur le long terme.

Le nucléaire assure en France 70 % de la production électrique. Le développement du nucléaire dans d'autres pays pourrait assurer à terme 15 % de réduction des émissions GES de la production électrique.

Les efforts technologiques dans le nucléaire doivent porter sur la réduction des coûts, le maintien de la flexibilité acquise depuis quinze ans, voire son accroissement, tout en maintenant un haut niveau de sûreté et l'amélioration de la fin du cycle.

Le potentiel de développement de l'énergie nucléaire dépasse largement les filières déjà exploitées. Au-delà de la génération III avec les variantes EPR, la génération IV en version surgénérateur apporte des horizons nouveaux.

L'évolution vers un développement rapide des énergies renouvelables (ENR) en substitution des énergies carbonées devrait permettre une diminution significative des émissions GES.

Plusieurs familles d'énergies renouvelables se dégagent :

- l'hydraulique : barrages et « au fil de l'eau » ;
- l'énergie solaire thermique pour un appoint de chauffage et de fourniture de d'eau chaude sanitaire. C'est une utilisation directe par le consommateur ;
- l'énergie solaire thermodynamique alimentant des turbines productrices d'électricité ;
- le photovoltaïque ;
- l'éolien et l'hydrolien (encore au stade exploratoire) ;
- la biomasse : carburants solides, alcool et huiles, méthanisation et carburants de substitution.

Seule la biomasse peut être gérée comme une source énergétique classique carbonée. L'hydraulique est disponible selon les besoins et constitue un stock d'électricité grâce aux lacs de retenue. La biomasse est avec l'hydraulique l'énergie renouvelable la plus importante en France et dans le monde. Par ailleurs les usages du bois en tant que combustible pour la production de chaleur et d'électricité sont beaucoup plus importants que les autres usages de la biomasse.

Les autres énergies renouvelables sont par définition intermittentes avec des variations très importantes suivant les heures, les ensoleillements, les saisons...

L'électricité, vecteur énergétique essentiel

Quels sont les moyens de production de l'électricité ?

- Des moyens indirects, par une source de chaleur pour une turbine actionnant un alternateur :
 - Avec des combustibles classiques, charbon, pétrole, gaz, donc carbonés,
 - Avec des gaz issus de la biomasse (décarbonés au sens fossiles),
 - Par des réacteurs nucléaires (décarboné),
 - Par l'énergie solaire (solaire thermodynamique, décarboné).
- Des moyens directs où un dispositif mécanique actionne un alternateur :
 - Turbines hydrauliques des barrages,
 - Éoliennes,
 - Hydroliennes (à plus long terme).
- Des moyens directs par le rayonnement solaire :
 - Panneaux photovoltaïques.

Les éoliennes (terrestre et *offshore*) et le photovoltaïque sont en plein développement. Les capacités totales installées fin 2014¹³ sont de 9,4 GW pour l'éolien, et de 5,7 GW pour le solaire photovoltaïque, soit des

¹³ Chiffres-clés 2015 pour les ENR publiés par le Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE) en décembre 2015, pp.15 et 18 [40].

augmentations respectives (par rapport aux puissances installées en 2013) de +14 % pour l'éolien et de +20 % pour le solaire photovoltaïque.

L'énergie solaire thermodynamique est bien adaptée aux pays très ensoleillés (voir projets au Maroc). Les hydroliennes sont au stade prototype. Contrairement à l'Allemagne, la biomasse, hors chauffage au bois (filière bois-énergie¹⁴ : près de 6 % de la consommation brute d'énergie finale en 2014), reste marginale (2 % en 2014, prévue pour passer à 2,4 % en 2020). Le développement des biocarburants peut se faire sans entrer en compétition avec la production alimentaire compte tenu de la surface agricole utile de la France et des rendements atteints.

Le vecteur électrique a la capacité de délivrer de l'énergie partout de façon instantanée, avec des niveaux de puissance très variés. Pour le nucléaire, source concentrée d'énergie dans un petit nombre de sites à très grande puissance, c'est le seul moyen de distribution possible. Pour une majorité d'ENR, hydraulique, éolienne, photovoltaïque, c'est aussi le seul moyen d'échange d'énergie entre site de production et lieux de consommation.

La France avec 70 % de sa production électrique d'origine nucléaire dispose d'un kWh très faible en carbone (71 g CO₂/kWh soit 7 fois plus faible qu'en Allemagne). Mais l'électricité a un gros défaut, celui d'être très difficile à stocker. Ce défaut sera un vrai problème dès que la part des ENR intermittentes deviendra importante dans le mix électrique.

En France, une partie de l'hydraulique est équipée pour du stockage (18 GW de centrales avec lac et 4,9 GW de STEP, station de transfert d'eau par pompage qui permettent des stockages de quelques heures). Le solaire thermodynamique permet un stockage (de la chaleur) sur 5 à 7 heures, de même que l'hydraulique au fil de l'eau (Rhén et Rhône : 4,4 GW). Ceci n'est pas suffisant pour régler le problème des intermittences ENR, bien que la flexibilité du nucléaire soit déjà bonne sur les réacteurs français.

Pour se faire une idée de la question des intermittences, examinons les taux de disponibilité, c'est-à-dire le ratio pour une année entre le nombre d'heures de production et le nombre d'heures de l'année, soit 8 760 heures. Ce ratio est de 23 % pour l'éolien et de 13 % pour le photovoltaïque, alors que le nucléaire a un ratio de 73 % (année 2012, source Réseau de transport d'électricité, RTE). Cette situation d'intermittence demande donc une exploitation particulière des centrales nucléaires, mais surtout l'exploitation de centrales thermiques (charbon, pétrole, gaz) pour satisfaire la demande en période de forte demande et/ou en période d'absence de vent ou de soleil. En 2012 ces centrales thermiques n'ont fonctionné qu'à 20 % de leur capacité, c'est-à-dire à perte, ce qui adviendrait aux centrales nucléaires si elles fonctionnaient de cette manière, ce qui est techniquement possible.

Le réseau de distribution électrique (moyenne et basse tension) est plus particulièrement impacté par cette évolution du fait qu'il n'a pas été conçu pour un raccordement massif d'ENR et de productions décentralisées ainsi que de nouveaux usages tels que les véhicules électriques et qu'il représente une infrastructure très étendue (1 300 000 km en France). Ainsi le raccordement massif des sources d'énergie locales peut induire de nombreux problèmes techniques sur le réseau : chute de tension, pertes harmoniques, changement de fréquence, stabilité, protection, fiabilité, etc. avec notamment le risque de perdre une grande quantité de productions décentralisées lors de fluctuations de fréquence ou de tension (protection de découplage).

Le réseau électrique, à cause de cette incapacité de stocker et déstocker très rapidement est un système difficile à gérer en particulier en période de forte consommation. Ainsi la question de la demande devient cruciale. Plus la part d'ENR intermittentes est importante et plus la question de gestion du réseau devient critique. Les capacités nouvelles d'échange d'information par le numérique devraient, comme dans d'autres

¹⁴ Chiffres-clés 2015 pour les ENR publiés par le MEDDE en décembre 2015, p.35 [40].

secteurs, apporter des réponses originales qui vont bousculer les modèles économiques actuels. Tarifs variables pour inciter la consommation à certaines périodes, pilotage à distance par l'opérateur pour intervenir directement sur la consommation et la réduire, usage de batteries domestiques en cas de coupure, par exemple avec le déploiement des véhicules électriques ou hybrides rechargeables... et bien d'autres nouvelles idées.

On voit que les technologies de l'information et de la communication (TIC) ont un rôle important à jouer dans les réponses originales qui seront apportées par les électriciens, comme le montre le rapport publié par l'Académie des technologies en décembre 2015 *Impact des TIC sur la consommation d'énergie à travers le monde* [42].

La résilience des installations énergétiques

Les mesures d'adaptation doivent prendre en compte l'ensemble des risques pouvant impacter la production et la transformation de l'énergie : inondations, phénomènes météorologiques extrêmes, vagues de chaleurs, accès à l'eau...

Tous les secteurs sont potentiellement impactés. Il est nécessaire d'améliorer la résistance du système électrique en intégrant ces nouveaux facteurs de risque. Il est possible d'enterrer les lignes électriques, de relever les digues de protection pour les sites en bord de mer, de modifier les conditions de production... Mais cela a un coût et nécessite des arbitrages entre des investissements à court terme et un risque aléatoire qui dépend beaucoup de la modification de l'usage des territoires et de l'augmentation de leur valeur économique et, donc, de leur vulnérabilité. Il est aussi possible d'améliorer la résilience de l'ensemble du système en assurant la sûreté des personnes et des équipements, en garantissant les services vitaux et un retour rapide aux conditions d'exploitation normale.

Cette démarche doit bien entendu être adaptée en fonction des spécificités des installations de production et de transformation d'énergie. Il est donc nécessaire de progresser sur la connaissance des principaux impacts. Il faudra aussi arbitrer entre résistance et résilience. Enfin il est vraisemblable que dans le secteur de l'énergie, la contrainte sur l'eau apparaîtra dans certaines régions avant la contrainte sur le climat.

Recommandations

- *Appréhender l'économie des technologies déployées, en fonction de la quantité de GES évité ou capturé, de manière à avoir dans chaque cas un coût du carbone évité : coût de production, coût pour le consommateur, coût marginal/coût comptable, investissements... Développer les modèles économiques pour chaque technologie en incluant les conséquences sur l'emploi et sur la balance commerciale de la France.*
- *Améliorer la flexibilité du système électrique dans le contexte d'une part croissante des productions intermittentes (solaire et éolien). Le stockage d'électricité, plus généralement d'énergie, est un enjeu majeur. Mais d'autres technologies peuvent aussi être envisagées : meilleure gestion de la demande, souplesse du réseau de transport/distribution, approche centralisée/décentralisée...*
- *Améliorer l'efficacité énergétique, non seulement en diminuant l'énergie consommée pour satisfaire un besoin, mais aussi en modifiant les pratiques d'usage de l'énergie pour obtenir une meilleure qualité de vie avec moins d'émissions de gaz à effet de serre.*

L'Académie des technologies souhaite aussi souligner les travaux et recommandations de l'Alliance ANCRE [43].

Par ailleurs, consciente du fait que les énergies fossiles resteront importantes pendant des décennies, elle se propose de mettre également en perspective les avancées des technologies d'exploration et d'exploitation de ces énergies, sources potentielles de productivité et donc d'économies d'émissions.

ÉCONOMIES D'ÉNERGIE DE L'INDUSTRIE FRANÇAISE ET BIOÉCONOMIE

Les économies d'énergie de l'industrie française

Dans son rapport sur la consommation énergétique de l'industrie française en 2014 [44], le Commissariat général au développement durable note que la consommation finale d'énergie de l'industrie a diminué de 0,9 % en 2014 par rapport à 2013, à 28,8 Mtep [millions de tonne équivalent pétrole]. Entre 1990 et 2008, elle était relativement stable. Puis elle a fortement chuté en 2009, suite à la crise économique, atteignant un premier plancher de 30,2 Mtep (- 13,0 %). Le redressement de 2010 (+ 3,5 %) n'a pas rattrapé ce décrochage, d'autant que les années suivantes n'ont connu que des baisses. Ainsi, entre 2011 et 2014, la consommation finale de l'industrie a reculé de 2,1 % par an en moyenne. En 2014, elle atteint donc son plus bas niveau depuis l'origine des séries du bilan de l'énergie en 1970.

Selon l'indice de production industrielle de l'Insee (IPI), la production de l'industrie continue de se contracter en 2014, tirée par le déclin de la construction. La baisse a toutefois ralenti : - 0,4 % en 2014, après - 1,5 % en 2013 et - 2,7 % en 2012. Dans son ensemble, la production manufacturière reste stable (+ 0,1 %). Cette stabilité globale masque quelques disparités notables, en particulier au sein des industries grandes consommatrices d'énergie. Ainsi, la production continue de reculer dans la fabrication de plâtres, chaux et ciments (- 6,2 %), dans l'industrie sucrière (- 4,1 %), dans celle du papier et du carton (- 3,9 %) et dans la fabrication d'engrais (- 3,6 %). À l'inverse, elle a tendance à progresser dans les autres secteurs de la chimie et elle bondit dans la sidérurgie (+ 7,0 %) et se redresse dans la métallurgie (+ 1,9 %).

En dix ans, le bouquet énergétique final de l'industrie a peu évolué. En 2014, l'électricité représente 35 % du mix, part quasi égale à celle du gaz (33 %). Les deux restent largement prépondérants devant le charbon (18 %). Le pétrole a nettement reculé, passant de 13 % en 2004 à 8 % en 2014. À l'opposé, la part des énergies renouvelables a progressé sensiblement passant de 4,6 % en 2004 à 6,5 % en 2014.

Ces chiffres montrent bien le rôle de la crise dans la diminution de la consommation énergétique industrielle. En creux, ils peuvent laisser penser qu'en période de croissance économique normale il soit à craindre que celle-ci repasse à la hausse, même si les conditions d'utilisation de cette énergie se sont considérablement améliorées au cours des 20 dernières années dans de très nombreux domaines, et continueront à le faire. On rappellera que les producteurs d'énergie ont obligation légale d'inciter leurs clients à économiser cette dernière.

L'économie circulaire, le recyclage, l'écoconception ou encore l'économie de fonctionnalité¹⁵ pourraient également contribuer aux améliorations. Les enjeux sont particulièrement importants en ce qui concerne la valorisation, le recyclage ou la réutilisation des matériaux, chaleur et effluents. La « coloration verte » (cf. chapitre VIII) est l'un des piliers fondateurs de l'industrie du futur.

La bioéconomie

L'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) a repris il y a une dizaine d'années le concept de « bioéconomie » comme une des « frontières technologiques » qui restent à franchir au cours

¹⁵ L'idée de l'économie de fonctionnalité est de repartir du besoin fonctionnel, posé de façon très générale, et de chercher à y satisfaire en utilisant un minimum de matière première et d'énergie, souvent en privilégiant le partage de biens matériels.

des 30 années à venir [45]. Elle a été précédemment théorisée par l'économiste Nicholas Georgescu-Roegen (1979) [46]. De son côté, Colin W. Clark a proposé de construire des modèles mathématiques combinant processus écologiques et économiques [47] afin de concevoir des méthodes de gestion optimale de ressources vivantes. En revanche, ce terme n'apparaît pas dans les rapports de la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture, *Food and Agriculture Organization of the United Nations*). Enfin, ce secteur a été identifié dans la stratégie nationale de recherche à laquelle l'Académie des technologies a contribué (2015) [48] : « *Les biotechnologies et plus généralement la bio-économie, qui concerne l'utilisation du vivant à des fins économiques, sont porteuses de développements technologiques très novateurs, nécessaires pour économiser nos ressources, substituer une énergie à une autre, ou concevoir des modes de production plus économes permettant une gestion sobre des ressources* ».

Elle inclut, mais non exclusivement, l'utilisation durable de biomasse (arbres, plantes, algues, déchets organiques) comme matière première pour la production alimentaire (humaine ou animale), industrielle et énergétique. Cette utilisation est renouvelable et même en partie amplifiable. Pour l'énergie, il s'agit de changer de paradigme en utilisant comme matières premières non plus les produits pétroliers fossiles (eux-mêmes à l'origine issus de la biomasse et stockés dans des couches géologiques) mais directement cette biomasse « durable » puisque produite de façon continue sur la planète, essentiellement par captation du CO₂ et sa transformation via la photosynthèse en sucres et métabolites biologiques. Le stockage du carbone grâce à la valorisation de produits du vivant comme le bois participe également à la gestion globale de carbone.

D'ores et déjà la bioéconomie européenne dans son ensemble large (EU28, 2011) emploie 19 millions de personnes dont 53 % pour les productions agricoles et est responsable d'un chiffre d'affaires annuel de 2 000 milliards d'euros (dont 43 % pour les productions alimentaires). Pour la France, ces chiffres sont respectivement de 1,8 million d'emplois et 300 milliards de chiffre d'affaires.

La chimie et l'énergie sont particulièrement en première ligne. L'union des industries chimiques, dont les membres utilisent déjà la biomasse pour près de 7 % de leurs produits affiche une volonté d'atteindre 15 % d'ici 2017 (pourcentage qui ne sera pas atteint) et de doubler encore d'ici à 2020 le volume de matières premières d'origine végétales. Les biocarburants qui démarraient de rien au début du XXI^e siècle représentent aujourd'hui 7 % de l'énergie présente dans les carburants routiers. Cependant cette filière est en concurrence avec d'autres facettes de la bioéconomie, notamment les matériaux et l'alimentaire.

Toutes les stratégies déjà publiées pour avancer dans cette ambition donnent un rôle important aux technologies issues des biotechnologies, perçues comme pouvant aider à résoudre nombre des défis qui se posent aux économies du monde et à la société de façon générale au cours des années à venir. La Commission européenne [49] a intégré cette vision dans ses programmes de développement. De nombreux États membres (Allemagne, Royaume-Uni, Hollande, pays nordiques) ont déjà publié leur propre document décrivant leur stratégie scientifique et technologique pour faciliter cette prise de conscience et la mise en œuvre de cette bioéconomie. La France a lancé cette réflexion et a démarré un Groupe de travail interministériel qui, en accord avec l'industrie, doit arriver à des propositions concrètes au début 2016.

Recommandations

- *Encourager les démarches de l'économie circulaire et de l'écoconception.*
- *Encourager le développement des usages des produits bio-sourcés dans la chimie, les matériaux et l'énergie notamment.*

Par ailleurs, l'Académie des technologies est prête à participer à l'établissement de la feuille de route sur la bioéconomie. Elle propose en particulier la mise en place d'un Conseil ad hoc, formé d'un petit nombre de personnalités, en charge d'assurer la coordination entre les différents axes de cette économie du vivant.

Dans le prolongement de la COP21, l'Académie des technologies recommande également de veiller à ce que tous les secteurs émetteurs soient incités à agir par des outils dont le coût soit proportionné aux économies d'émissions.

TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION ET DE LA COMMUNICATION

Le secteur des technologies de l'information et de la communication (TIC) intervient dans le changement climatique et la consommation énergétique sous deux aspects opposés :

- par une consommation électrique des ordinateurs des réseaux fixes et mobiles, et des équipements périphériques en très forte croissance ;
- par un rôle majeur dans les processus permettant de contrôler et réduire la consommation dans les usages et processus.

Le secteur des TIC et la consommation énergétique

Les TIC consomment l'énergie électrique pour communiquer (environ 25 %), pour les grands centres de calcul (environ 25 %), et pour l'usage courant (machines individuelles, serveurs de bureau, communications locales, imprimantes, etc.). Cette consommation de 4,7 % de l'énergie électrique au niveau mondial en 2012 [50] connaît une augmentation annuelle de l'ordre de 5 %.

Le modèle actuel des télécommunications fondé sur la concurrence entre opérateurs, notamment en matière de stations de base, d'écoulement de trafic par paquets, de signalisation, etc., ne favorise pas (au contraire) l'usage modéré de l'énergie dans ce secteur. Un modèle économique passant par le partage ou la mise en commun des ressources physiques pourrait permettre de faire des économies d'énergie.

Les *Data Centres* doivent fonctionner avec un taux de charge intermédiaire, entre la charge élevée qui minimise la consommation d'énergie, et la charge faible qui optimise le service rendu aux clients. À travers le *Cloud*, une répartition de charge entre *Data Centres* pourrait optimiser leur fonctionnement sur de grands ensembles géographiques, traitant des masses de requêtes qui arriveraient (en particulier) de la part des mobiles.

Par ailleurs des travaux très importants se développent au niveau des composants et des architectures informatiques pour réduire de manière massive la consommation énergétique. Sans ces travaux, l'accès à de très grandes puissances de calcul ne pourrait en outre pas être envisagé.

Enfin la composante logicielle et algorithmique joue un rôle important dans la réduction de la consommation. Un algorithme se compare non seulement par sa vitesse (nombre d'opérations par seconde) mais aussi par sa consommation par opération.

L'internet des objets provoquera – au travers de ses capteurs communicants, mais aussi à travers l'augmentation massive du transfert de données et du traitement de masse –, une augmentation sensible de la consommation d'énergie par les TIC.

Il faudrait donc viser la mise en place de nouveaux programmes qui pourraient développer l'usage de sources d'énergies renouvelables fondées sur la « récolte d'énergie » (vibrations, récupération électromagnétique, photovoltaïque...) pour les capteurs et les centres de traitement intermédiaires (routeurs) de l'internet des objets.

Les TIC facteur d'économie dans l'industrie

Les TIC, et notamment les technologies autour du *Big Data*, interviennent largement dans l'ensemble des systèmes permettant de maîtriser ou de réduire les impacts des activités sur l'environnement et le changement climatique. Pour illustrer ce point on peut fournir quelques exemples :

- la gestion des systèmes urbains et des immeubles intelligents (énergie, eau, trafic routier...), ainsi que le télétravail, contribuent à la diminution des transports automobiles ;
- la commande informatisée des moteurs des véhicules, permet de réduire sensiblement leur consommation de carburant ;
- la conception/fabrication assistées par ordinateur et la modélisation permettent d'optimiser les formes et les matériaux des véhicules pour réduire leurs besoins énergétiques ;
- le développement des TIC autour de l'agriculture numérique (gestion des ressources naturelles, minimisation des intrants...) ;
- le contrôle des processus industriels dans les grands secteurs manufacturiers fort consommateurs d'énergie ;
- le développement des nouveaux modes d'usage fondés sur le partage et l'aspect coopératif (transport...).

Ainsi, en France, les technologies de modélisation, de simulation et de *Big Data* ont été retenues dans le cadre du plan industriel « supercalculateurs », pour différents secteurs, notamment :

- l'ingénierie et secteurs des industries manufacturières : réduction des pollutions, des consommations ou amélioration des processus ;
- le secteur de la ville et de l'urbanisme : bâtiments et quartiers y compris rénovations, gestion des environnements (transport, distributions énergétiques...) ;
- le secteur du végétal : réduction des gaz à effet de serre (GES), gestion des ressources naturelles et des intrants...

Des progrès considérables peuvent donc être apportés par ces technologies qui aujourd'hui sont matures et doivent être largement diffusées dans le tissu des acteurs économiques. En effet, le rapport du *World Wild life Forum* en 2012 chiffrait ces impacts positifs au niveau mondial à 4 Gt de CO₂ en 2030 [51] en scénario médian. Nous pouvons déduire de ces travaux que la contribution des TIC à la réduction des GES sera supérieure aux émissions produites par les TIC. La récupération de la chaleur générée par les ordinateurs améliorera encore ce bilan. Néanmoins, la grande inconnue reste l'impact de l'internet des objets et l'objectif des travaux à venir doit être de créer un système TIC encore plus efficace énergétiquement.

Recommandations

- *Mettre en place un nouveau modèle économique qui favorise le partage ou la mutualisation de l'infrastructure physique permettrait de faire des économies d'énergie significatives.*
- *Développer des technologies d'optimisation de charge entre Data Centres du Cloud. Soulignons aussi que la part du nucléaire dans la production d'électricité en France fait que nous disposons pour les Data Centres de l'offre d'énergie la moins chère avec un impact CO₂ le plus faible.*
- *Favoriser le développement et l'utilisation d'architectures de machine et de systèmes d'exploitation, de logiciels et d'algorithmes, économes en énergie et lancer une initiative de recherche et développement dans ce secteur, y compris pour l'exploitation des technologies de « récolte d'énergie » (« energy harvesting ») dans les TIC.*

- *Développer des méthodes de prévision de l'impact énergétique du déploiement des systèmes d'information en tant que système global.*
 - *Lancer une initiative nationale « nouveaux matériaux et modèles de calcul » pour identifier des technologies numériques ayant une consommation faible d'énergie.*
 - *Développer des actions favorisant l'usage des TIC dans l'industrie pour mesurer, prévoir et réduire la consommation d'énergie.*
 - *Poursuivre activement les actions déjà initiées pour favoriser l'usage des TIC dans tous les secteurs industriels et de services pour accroître l'efficacité énergétique de l'économie.*
-

LA GÉO-INGÉNIERIE DU CLIMAT

Au-delà des méthodes d'atténuation et d'adaptation qui ont été présentées dans les chapitres précédents, la géo-ingénierie tient une place particulière en ce sens que ses actions délibérées concernent le plus souvent l'échelle globale. La géo-ingénierie rassemble des propositions où la technologie est un point de passage obligé, même si elle laisse la place aussi à des pratiques (par exemple culturelles) avec relativement peu de technologie. La géo-ingénierie, dont certaines propositions ne vont pas sans poser d'importants problèmes scientifiques, technologiques et éthiques, se distingue de l'atténuation et de l'adaptation, même si les frontières peuvent parfois rester un peu vagues [52].

On distingue deux grandes catégories de méthodes :

- la gestion du rayonnement solaire SRM pour *Solar Radiation Management* ;
- les techniques de captation du dioxyde de carbone CDR pour *Carbon Dioxide Removal*.

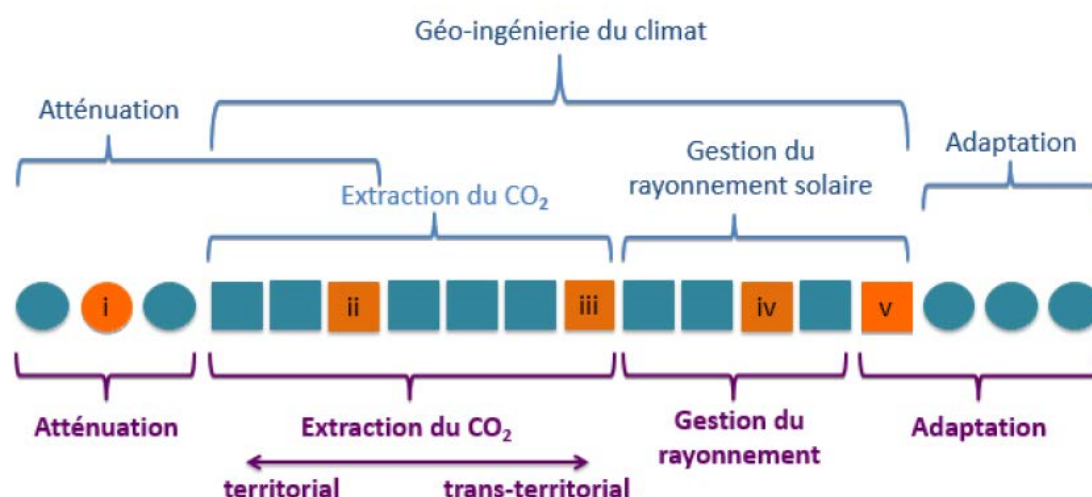


Figure 7.1. Nouvelle classification (en violet) des techniques de géo-ingénierie du climat dans le contexte des réponses possibles au changement climatique. Les carrés représentent les techniques ou pratiques qui sont généralement classées comme relevant de la géo-ingénierie du climat, alors que les cercles représentent les autres approches. Les exemples en orange incluent (i) le développement des énergies renouvelables, (ii) l'utilisation de la biomasse comme source d'énergie couplée au captage du CO₂, (iii) la fertilisation des océans par des nutriments comme le fer, (iv) l'injection d'aérosols stratosphériques, et (v) le blanchiment des toitures. (Adapté de Boucher et al., WIREs Clim Change, 2014 [52]).

Les technologies de gestion du rayonnement solaire

Ces technologies n'ont pas pour objectif de diminuer la quantité de gaz à effet de serre (GES) présente dans l'atmosphère, mais de lutter contre leurs effets, principalement le réchauffement et certains des impacts directement associés au réchauffement (comme les vagues de chaleur ou certaines situations de précipitations extrêmes). On peut citer (cf. Figure 7.2.) :

- les réflecteurs spatiaux, à mettre en place au point de Lagrange afin de renvoyer une petite fraction de l'énergie solaire, tels que proposés par le physicien R. Angel ; ils sont parfois évoqués comme une

possibilité. Toutefois leur déploiement n'a pas été étudié en détail, sans doute en raison du faible degré de réalisme de cette technologie, confirmé par un rapport récent du Centre national d'études spatiales (CNES) [53] ;

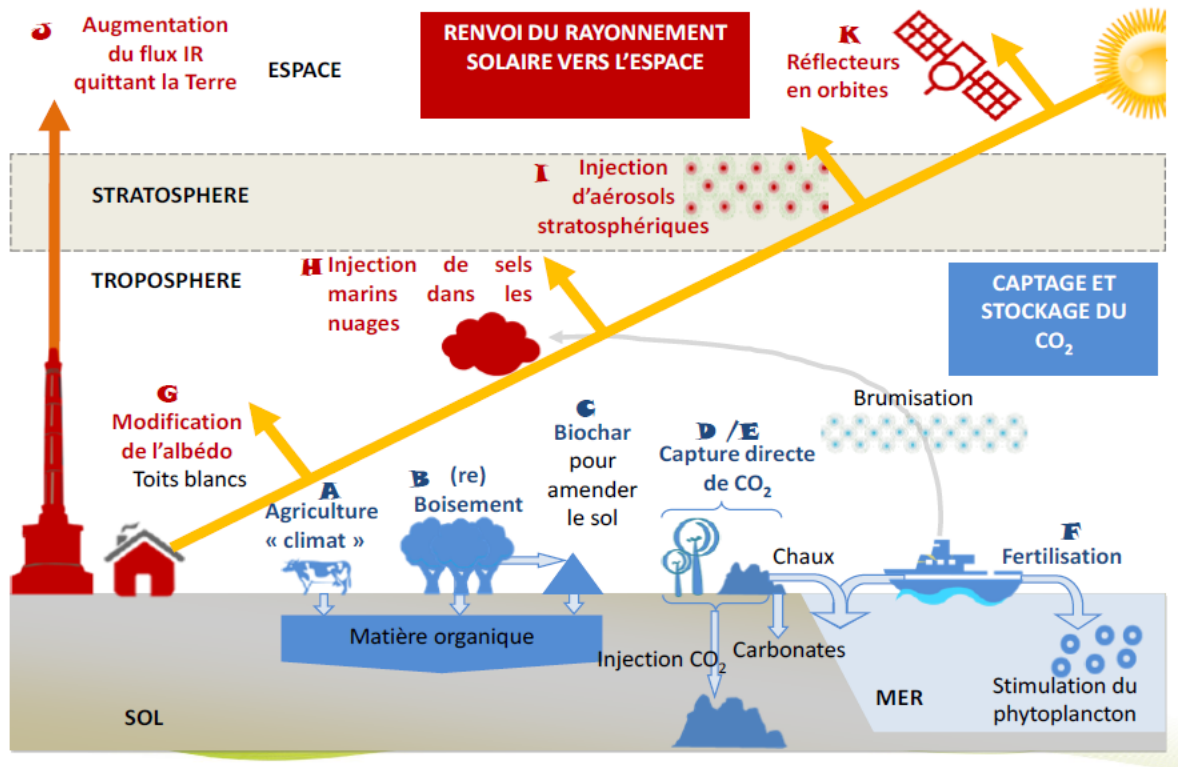


Figure 7.2 - Les principaux concepts de la géo-ingénierie du climat. La figure ci-dessus présente les principaux concepts de la géo-ingénierie du climat. Les voies de captation et de stockage du CO₂ atmosphérique (en bleu) sont différenciées des voies de gestion de l'équilibre radiatif de la planète, en particulier via le rayonnement solaire (en rouge). D'après de Guillebon et al., 2014 [54].

- l'injection stratosphérique d'aérosols soufrés, ou de précurseurs d'aérosols, est sans doute la méthodologie qui, sans être souhaitable, semble la plus crédible du point de vue technologique (voir par exemple la figure 5.1 dans *Geoengineering the climate : Science, governance and uncertainty*, The Royal Society, 2009 [55]). Les technologies d'injection d'aérosols soufrés n'existent pas, mais semblent pouvoir être développées à peu de frais, au moins de manière assez « rustique » [56]. Il faut toutefois souligner que les effets induits par cette technologie ne sont pas bien connus. L'injection devrait être continue et réalisée en plusieurs points du globe préférentiellement situés dans la bande tropicale, de manière à maximiser l'impact de l'injection. Mais les modifications climatiques induites par l'injection d'aérosols stratosphériques sont relativement peu pilotables au-delà de la modulation de l'équilibre radiatif global. Les effets induits sur la physico-chimie de la stratosphère, en particulier sur l'équilibre de l'ozone, restent encore mal connus ;
- l'ensemencement troposphérique, pour augmenter la réflectivité des nuages bas, a également été proposé, en particulier au-dessus des océans. Les effets climatiques sont encore moins bien maîtrisés que dans le cas de l'injection stratosphérique. Les technologies ne sont pas simples. Elles impliquent la pulvérisation de grosses quantités d'eau de mer, qui contiennent des impuretés, et un refroidissement par évaporation des aérosols de sels marins injectés qui font retomber la masse d'air ;
- une autre approche consisterait à augmenter l'albédo des surfaces. On peut différencier ici les surfaces maritimes (où une augmentation de la réflectivité par microbulles apparaît peu réaliste) des surfaces continentales où une augmentation plus locale peut s'apparenter à des techniques d'adaptation (cultures plus réfléchissantes, bâtiments peints en blanc).

Dans tous les cas, un climat régulé par de telles technologies de gestion du rayonnement solaire connaîtrait néanmoins des changements résiduels assez forts à l'échelle régionale, en particulier en termes de possibles changements des régimes de précipitations. Se poserait aussi le risque d'un « rattrapage climatique » rapide si, les concentrations en GES continuant d'augmenter, la gestion du rayonnement solaire venait à être stoppée après un certain temps.

Les technologies d'extraction du carbone de l'atmosphère

Ces techniques ou technologies ont pour objectif de s'attaquer à la cause première du changement climatique en réduisant la quantité de GES présente dans l'atmosphère. Si, en principe, ces techniques ou technologies peuvent concerner n'importe quel GES de longue durée de vie, dans la pratique seules des techniques concernant le dioxyde de carbone ont véritablement été considérées jusque-là. Un certain nombre de méthodes ont ainsi été proposées :

- l'extraction de CO₂ via la biosphère terrestre : reforestation, afforestation, stockage accru dans les sols via des modifications des techniques agricoles et culturales, toutes ces techniques d'initiative locale sont praticables sous réserve de conditions économiques réalistes...
- le stockage de carbone dans les sols via un « bio-charbon » obtenu par pyrolyse de la biomasse cultivée. La durée de stockage de tels bio-charbons n'est toutefois pas connue de façon très précise ;
- l'extraction via la biosphère marine. Certaines zones océaniques pourraient en effet voir leur richesse en phytoplancton être augmentée par apport de fertilisants, tels le fer. Des expériences de tels enrichissements océaniques ont été menées, avec toutefois des résultats très variables : la chaîne « phytoplancton – zooplancton - animaux supérieurs » est en effet très complexe. Ces expériences font actuellement l'objet d'un quasi-moratoire ;
- l'extraction géologique en faisant réagir le CO₂ atmosphérique sur des roches. Il faut compenser la faible réactivité chimique de ces roches par le broyage de quantités importantes. De plus, il faudrait neutraliser le CO₂ capté ou accepter une modification de la composition chimique de l'océan si le carbone est stocké sous forme de carbonates ;
- la captation atmosphérique par des voies chimiques. Si les technologies sont identifiées (adsorption sur des solides, absorption par des solutions plus ou moins alcalines – CaO, NaOH... –, avec ou sans catalyseur...), la forte dilution du dioxyde de carbone atmosphérique rend néanmoins cette méthode peu efficace, en dehors évidemment de la captation à la source sur les sites émetteurs (centrales, cimenteries...). Ces technologies focalisent une certaine activité de recherche, en particulier à l'étranger, dans la mesure où (i) elles pourraient bénéficier à d'autres procédés industriels liés au dioxyde de carbone et (ii) elles pourraient devenir économiquement viables dans des scénarios présentant des ruptures technologiques importantes quant à la production d'énergie décarbonée de bon marché.

Des problèmes de changement d'échelle se posent en termes de stockage géologique du CO₂, économiques, énergétiques, de recyclage des nutriments (méthodes biomasse) ou des solvants (méthodes chimiques). Il est nécessaire de bien différencier les techniques appliquées à l'échelle d'un territoire particulier, comme celles qui concernent les sols ou les forêts, qui sont réalistes et potentiellement réalisables, de celles qui ne le sont de façon interterritoriale, avec des conséquences et des effets secondaires.

Conclusions

Le concept même de géo-ingénierie est lourd d'enjeux, de valeurs et de représentations.

Il faut distinguer entre les technologies irréalistes (miroirs spatiaux) ou inefficaces à l'échelle du problème climatique (augmentation de l'albédo des surfaces), les technologies dangereuses car susceptibles de déclencher des effets secondaires ou des rétroactions de portées inconnues (ensemencement océanique ou

atmosphérique], et les technologies qui pourront être des aides à la réduction des émissions de GES (certaines techniques d'extraction de carbone).

On voit aussi apparaître des techniques où l'activité de géo-ingénierie arrive en seconde intention (par exemple, un refroidissement localisé peut être greffé à la production d'énergie renouvelable, la capture du CO₂ peut être associée à un dessalement de l'eau de mer, etc.).

Dans tous les cas se pose aussi, et de façon cruciale, le problème de la gouvernance à mettre en place. Il est important que la communauté de R & D (recherche et développement) entre en dialogue avec la société civile de façon ouverte à toutes les sensibilités éthiques.

Les limites et les risques de ces technologies doivent être pleinement prises en compte, évitant ainsi qu'elles ne puissent être vues comme des solutions miracles, prétexte à l'inaction en matière d'atténuation et d'adaptation au changement climatique.

Que ce soient les méthodes de gestion du rayonnement solaire, qui ne s'attaquent pas aux causes du changement climatique mais simplement à certains de ses effets (réchauffement), ou les méthodes d'extraction du carbone atmosphérique, qui se donnent quant à elles pour objectif de réduire la concentration des gaz à effet de serre, toutes utilisent comme justification de départ un phénomène physique avéré : effet réfléchissant de certains types de particules atmosphériques, stimulation de la biosphère continentale ou océanique... Toutefois, dans l'état actuel, ces méthodes restent au niveau de propositions conceptuelles. D'une part certaines méthodes ne semblent pas capables d'agir de façon significative à l'échelle globale. D'autre part les rétroactions susceptibles d'être déclenchées dans la complexité du système climatique, rétroactions pouvant entraîner des effets secondaires incontrôlés et néfastes (sur la biosphère, sur les circulations atmosphériques et océaniques...) ne sont pas étudiées et comprises au niveau nécessaire. Enfin certaines des technologies nécessaires ne sont pas maîtrisées de telle sorte que leur niveau de TRL (niveau de maturité technologique) reste très bas. Qui plus est, reste posée la question du rebond (reprise à un rythme accéléré) du changement climatique qui serait causé par un arrêt des méthodes de gestion du rayonnement solaire.

Recommandations

- *Soutenir et financer les recherches sur l'analyse des techniques de géo-ingénierie dites « de seconde intention », qui représentent un risque limité par rapport aux bénéfices attendus et pourraient bénéficier d'un modèle économique plus favorable dès lors que la composante climatique pourrait être valorisée.*
- *Au plan général, poursuivre les recherches sur les méthodes de géo-ingénierie, permettant aussi de maintenir une expertise nationale.*

L'Académie des technologies considère toutefois qu'il ne peut s'agir, dans l'état actuel des connaissances, de solutions alternatives à l'atténuation, voire à l'adaptation.

EMPLOI, COMPÉTENCES ET FORMATIONS

La résistance au changement climatique et les remèdes à ses effets les plus néfastes passent par des professionnels bien formés, des médiateurs convaincants, des citoyens responsables. D'où l'impératif d'une prise de conscience collective, ce que nous appelons une « coloration verte », un élément commun au bagage de compétences des professionnels de tous niveaux de qualification comme aux choix qui traduisent l'engagement de citoyens responsables. Cette « coloration verte », directement inspirée des fondements de l'écotechnologie, prend en considération, à toutes les échelles spatiales et temporelles, les impacts de chaque action sur la nature, selon la célèbre formule « du berceau à la tombe ». L'analyse du cycle de vie (ACV) permet d'évaluer les émissions de gaz à effet de serre (GES) qui en résultent ; l'ACV devient ainsi un référent, une sorte de « guide pratique » pour s'adapter au changement climatique et l'atténuer.

La pratique de l'analyse du cycle de vie dans la société française

Concrètement, dans chaque décision à prendre, la multiplicité des effets aux différentes échelles spatiales et temporelles conduit à solliciter des univers techniques distincts : dès lors, pour fonder logiquement une décision, la complexité qui découle de cette diversité implique un élargissement de l'horizon technique et un recours aux concepts de modèles et de systèmes. Il s'agit là d'une évolution importante dans la culture scientifique et technique traditionnelle. Pour quantifier les ACV, il est nécessaire, en effet, de maîtriser l'utilisation de logiciels simulant des ensembles de modèles et systèmes ainsi que leurs interactions, ce qui implique un certain bagage en mathématiques et informatique.

- Pour les professionnels tout d'abord, il faut préparer les spécialistes de chaque métier à une expérience de collaboration étroite avec des spécialistes d'autres métiers, conduisant notamment à une évolution sensible des fonctions de coordination de type « chefs de chantier », à un rapprochement de la production et des services et à démontrer une capacité, y compris dans les premiers niveaux de qualification, à se servir avec pertinence des outils numériques et de rudiments de modélisation et d'approche systémique.
- Au sein des professionnels, la catégorie des « médiateurs » exerçant leur activité à l'interface entre décideurs (politiques et industriels), producteurs et grand public – catégorie où figurent en bonne place les enseignants et les journalistes –, exerce une responsabilité particulière car il lui revient de faire passer une logique scientifique et technique auprès de partenaires plus sensibles à l'émotion. D'où l'importance d'une double culture qui considère l'ACV comme un complément indispensable des fondations scientifique et technique de leur bagage traditionnel¹⁶.
- Après du grand public enfin, composante essentielle du succès ou de l'échec des mesures destinées à contenir et réduire les émissions de GES et, de manière plus générale, de respecter l'environnement, il convient de renforcer, notamment au collège et au lycée, la pratique des travaux pluridisciplinaires et d'encourager l'usage des outils numériques et de la programmation.

L'engagement de l'institution éducative dans la formation générale et professionnelle des jeunes

Sans occulter l'ampleur des investissements qui restent à engager à ce jour au sein du système éducatif, il faut se réjouir des initiatives de la fondation La main à la pâte et de l'information scientifique et technique

¹⁶ Prendre garde aussi à ne pas préconiser la démarche inverse qui consisterait à prendre l'ACV comme la fondation du métier, à compléter par un vocabulaire scientifique et technique qui aurait rapidement du mal à convaincre ses interlocuteurs.

pour introduire une pratique de la multidisciplinarité dès l'école élémentaire et le collège, ainsi que de la place occupée par la prévention des émissions de GES dans les programmes du collège. L'Académie des technologies, si elle se réjouit aussi de la place nouvelle accordée à l'informatique en classe terminale, regrette que l'écotechnologie ne figure toujours pas, comme elle l'avait recommandé, dans les enseignements des filières d'enseignement général au lycée.

En revanche, les orientations prises plus récemment dans les enseignements professionnels et technologiques vont incontestablement dans la bonne direction, tant avec l'introduction des concepts de modèles et de systèmes que dans un certain décroisement des spécialités techniques qui mériteraient sans doute d'intégrer les biotechnologies dont le rôle est essentiel pour contenir les émissions de GES.

La grande majorité des filières professionnelles conduisant, au-delà du baccalauréat, aux métiers directement impliqués dans la lutte contre le changement climatique sont également bien orientées pour conférer la « coloration verte » : on note les efforts notables vers l'interdisciplinarité, la pratique de la modélisation et de l'approche systémique et la mise au point d'innovations de rupture. On relève plus particulièrement l'engagement de structures transversales aux différents niveaux de qualification comme les campus des métiers – campus où coopèrent diverses institutions de formation et entreprises – et dont la mise en place, souvent encouragée par des perspectives d'emplois favorables, mérite d'être soutenue. Pour sa part, l'Académie des technologies pourrait contribuer au repérage des ces innovations de ruptures et aux meilleures conditions pour leur développement.

La priorité à la formation continue

Les activités directement impliquées par la mobilisation des technologies pour contenir le changement climatique sont décrites dans différents travaux relatifs à l'économie verte (INSEE - 2012, CGDD - 2014 et CESE - 2015)¹⁷. Le nombre des professionnels concernés tourne autour de 5 millions dont une moitié seulement dispose d'une « coloration verte ». Indépendamment d'ajustements rendus nécessaires par la mise au point et l'agencement de technologies spécifiques souvent liées à des ruptures, le risque de disqualification menace des secteurs importants, notamment dans le bâtiment, les transports ou l'agronomie. Il s'agit donc de promouvoir des actions visant la requalification de ces actifs, en misant notamment sur le potentiel important de recyclage de technologies traditionnelles qu'il s'agit d'agencer entre elles pour les utiliser dans les objets et services porteurs de réduction de GES. Il convient de réfléchir aux évolutions structurelles des secteurs sensibles, en récession programmée en raison des quantités de GES qu'ils émettent, secteurs qui devraient envisager des changements importants dans la façon de travailler, voire de mettre en question la notion de « métier » qu'il devient de plus en plus difficile de relier à un corpus technique bien défini.

¹⁷ INSEE Institut national de la statistique et des études économiques, CGDD Commissariat général au développement durable, CESE Conseil économique, social et environnemental.

Recommandations

- *Créer des chaires centrées sur la théorie économique de l'économie circulaire et sur l'enseignement des pratiques des analyses du cycle de vie, afin de mettre en évidence la monétisation des externalités de ces nouvelles pratiques.*
 - *Intégrer l'écotechnologie dans les enseignements des filières d'enseignement général au lycée ; intégrer les biotechnologies dans les enseignements professionnels et technologiques.*
 - *Encourager les innovations pédagogiques à même d'accompagner la prise en compte du développement durable dans la diversité des métiers directement concernés.*
-

Recommandations de l'Académie des technologies visant à accompagner la mise en œuvre des décisions de la COP21

En instaurant une dynamique d'accord, de contribution volontaire des Etats, de financement des investissements (fonds vert pour le climat) et d'engagement de l'ensemble de la société (Plan d'actions Lima-Paris), la COP21 marque une étape importante dans la construction d'une politique mondiale dans le domaine du climat.

Dans la mise en œuvre des décisions afférentes, la technologie au sens large (*y compris l'organisation, les pratiques...*) est amenée à jouer un grand rôle. Le développement de technologies existantes ou nouvelles, et les ruptures technologiques font en effet partie des solutions possibles pour atténuer le changement climatique, lutter contre ses effets négatifs et tirer profit de ses conséquences positives.

Ce rapport illustre le rôle important que les technologies, existantes ou à venir, ont à jouer vis-à-vis du changement climatique, et présente un certain nombre de recommandations pour y contribuer.

Recommandations sectorielles

Les conséquences du changement climatique concerneront pratiquement toutes les activités humaines. C'est pourquoi ce rapport couvre un spectre très large de secteurs, ceux qui nous ont semblé les plus concernés. La liste ci-après reprend les recommandations sectorielles émises dans les différents chapitres.

Agriculture, forêts et sols

Trois « sauts technologiques » sont d'ores et déjà nécessaires, auxquels il conviendra d'ajouter les voies approfondies par le groupe de travail de l'Académie des technologies concernant les nouvelles technologies agricoles (Commission Biotechnologies). Il s'agit :

- d'approfondir la connaissance des communautés microbiennes des sols et de leurs effets ; ces communautés, en interaction avec le système racinaire, permettent l'absorption de l'azote de l'air par certaines plantes (légumineuses) ; ainsi cette capacité de fixation si elle était élargie à d'autres espèces pourrait conduire à diminuer les apports par les engrais et de là à réduire l'utilisation du carbone fossile nécessaire à la production des engrais ;
- de mettre au point des outils de mesure rapides et parfois à distance des caractéristiques des sols ou de la biomasse, d'établir des bases de données collectives, d'utiliser la modélisation et la simulation pour mettre au point ou améliorer des outils d'aide à la décision et ainsi améliorer les pratiques agricoles, par exemple dans l'utilisation de traitements sanitaires ;
- de simuler, modéliser et délibérer collectivement sur les aménagements souhaitables ou nécessaires pour adapter les forêts comme les zones agricoles aux nouvelles conditions climatiques, en interaction avec les acteurs concernés, comme cela s'est fait en Aquitaine ou dans plusieurs États nord-américains.

Eau, océans, littoral et terres basses

En ce qui concerne l'eau continentale et les ressources hydriques

Les incertitudes demeurent importantes, même si l'augmentation de température tend à intensifier le cycle hydrologique on éprouve encore des difficultés à en prévoir les conséquences. Les recommandations d'action identifiées sont :

- d'améliorer les modèles et leur utilisation. Celle-ci doit être raisonnable et... raisonnée. On voit aussi que l'étude du passé aux échelles historiques, préhistoriques, et paléontologiques devrait être mieux prise en compte et même développée, au moins dans ce contexte. Ces travaux devraient concerner les variations climatiques et leurs effets. En plus, pour la période historique, l'histoire des techniques de gestion de l'eau, des pratiques et des produits agricoles ;
- de privilégier la recherche de progrès technologique améliorant la gestion des systèmes hydrologiques, plus généralement de la ressource en eau, stockage y compris, et des milieux fluviaux et lacustres. Lorsque des travaux d'hydrauliques doivent être réalisés pour s'adapter à un changement climatique (barrage, canaux de transferts à longue distance, alimentation de nappe...) il faut les planifier dans le temps et imaginer des schémas d'infrastructures suffisamment adaptables pour qu'ils gardent leur pertinence dans un climat qui évolue.

Pour les mers, les océans, les littoraux et les terres basses

Les discussions au sein de l'Académie des technologies ont permis d'identifier les recommandations d'action suivantes :

- renforcer les moyens d'observation océanographiques (Flotte Océanographique Française), spatiales et terrestres ;
- étant donné l'ampleur et la diversité du domaine maritime, des responsabilités afférentes, des ressources qu'il contient, des compétences déjà existantes, soutenir fermement un effort d'innovations et de développements technologiques à la mesure de cette importance ;
- innover et investir en matière d'instrumentation et de modélisation ;
- instaurer, par l'État, la prise en compte d'une carte de l'élévation progressive du niveau de la mer, (à l'instar de la réglementation sismique) pour aider les aménagements et les constructions en zones côtières ;
- créer dans les villes côtières des schémas directeurs d'évacuation des eaux pluviales urbaines ;
- introduire le risque d'érosion du rivage et celui de hausse du niveau de la mer dans les Plans de Prévention des Risques d'Inondation (PPRI) des communes littorales ;
- mieux comprendre et évaluer les impacts sur l'aquaculture et plus généralement sur la ressource halieutique.

Enfin, il est utile de percevoir les changements ci-dessus en ne nous figeant pas sur les risques, mais aussi en termes d'opportunités avec autant d'occasions de progrès scientifiques, technologiques et économiques, ainsi que d'amélioration des conditions de vie des sociétés humaines. On peut penser à l'architecture adaptée, aux aménagements urbains offshore, à la production d'énergie à partir de sources marines (courants et marées), à la poldérisation, au développement de l'aquaculture, etc. Il est aussi important de replacer les dynamiques actuelles dans un contexte historique et paléontologique. De plus, les connaissances acquises à ce propos pourraient permettre d'utiliser les modèles en faisant des « rétro-calculs » et de là vérifier leurs capacités à « prévoir le passé » et, plus généralement, leurs performances.

Bâtiment, urbanisme, mobilité, transport

- élaborer des solutions globales adaptées à tous types de villes ; rechercher la diversification de l'offre de mobilité (transports collectifs, véhicules particuliers, poids lourds) et la mutualisation des modes de transport (dont intermodalité) ; développer les services de proximité économes en déplacement ;
- exploiter les technologies numériques pour la ville : services, activités productives et commerce, éducation, santé etc. notamment pour recycler ou stocker l'énergie et réduire les déplacements contraints (notamment par la redistribution des activités et le télétravail) ;
- établir le bilan et les perspectives de la motorisation électrique : mobilité/stockage d'énergie/connectivité, et penser le véhicule comme un service ;

- structurer l'offre des professionnels en matière de nouvelles technologies associées aux améliorations énergétiques, et accélérer leur formation ;
- relancer la filière de construction fondée sur le bois ;
- lever les blocages réglementaires qui interdisent le déploiement de nouveaux services urbains : création du statut d'auto-producteur d'énergie, mutualisation énergétique entre bâtiments, gestion de bâtiment multi-usages à énergie positive, usage de véhicules autonomes ;
- réduire les délais administratifs au lancement effectif de la construction des infrastructures publiques ;
- transposer vers l'ensemble du bâti les avancées démontrées dans la construction neuve ; développer les échanges d'énergie et de chaleur ;
- limiter les accès au centre-ville des véhicules privés ; optimiser le stationnement de surface ; mieux gérer la logistique du dernier kilomètre ;
- soutenir la dynamique de l'Institut de la ville durable.

Énergie

- appréhender l'économie des technologies déployées, en fonction de la quantité de GES évité ou capturé, de manière à avoir dans chaque cas un coût du carbone évité : coût de production, coût pour le consommateur, coût marginal/coût comptable, investissements... Développer les modèles économiques pour chaque technologie en incluant les conséquences sur l'emploi et sur la balance commerciale de la France ;
- améliorer la flexibilité du système électrique dans le contexte d'une part croissante des productions intermittentes (solaire et éolien). Le stockage d'électricité, plus généralement d'énergie, est un enjeu majeur. Mais d'autres technologies peuvent aussi être envisagées : meilleure gestion de la demande, souplesse du réseau de transport/distribution, approche centralisée/décentralisée...
- améliorer l'efficacité énergétique, non seulement en diminuant l'énergie consommée pour satisfaire un besoin, mais aussi en modifiant les pratiques d'usage de l'énergie pour obtenir une meilleure qualité de vie avec moins d'émissions de gaz à effet de serre.

L'Académie des technologies souhaite aussi souligner les travaux et recommandations de l'Alliance ANCRE.

Par ailleurs, consciente du fait que les énergies fossiles resteront importantes pendant des décennies, elle se propose de mettre également en perspective les avancées des technologies d'exploration et d'exploitation de ces énergies, sources potentielles de productivité et donc d'économies d'émissions.

Industrie et bioéconomie

- encourager les démarches de l'économie circulaire et de l'écoconception ;
- encourager le développement des usages des produits bio-sourcés dans la chimie, les matériaux et l'énergie notamment.

Par ailleurs, l'Académie des technologies est prête à participer à l'établissement de la feuille de route sur la bioéconomie. Elle propose en particulier la mise en place d'un Conseil ad hoc, formé d'un petit nombre de personnalités, en charge d'assurer la coordination entre les différents axes de cette économie du vivant.

Dans le prolongement de la COP21, l'Académie des technologies recommande également de veiller à ce que tous les secteurs émetteurs soient incités à agir par des outils dont le coût soit proportionné aux économies d'émissions.

Technologies de l'information et de la communication (TIC)

- mettre en place un nouveau modèle économique qui favorise le partage ou la mutualisation de l'infrastructure physique permettrait de faire des économies d'énergie significatives ;

- développer des technologies d'optimisation de charge entre Data Centres du Cloud. Soulignons aussi que la part du nucléaire dans la production d'électricité en France fait que nous disposons pour les Data Centres de l'offre d'énergie la moins chère avec un impact CO₂ le plus faible ;
- favoriser le développement et l'utilisation d'architectures de machine et de systèmes d'exploitation, de logiciels et d'algorithmes, économes en énergie et lancer une initiative de recherche et développement dans ce secteur, y compris pour l'exploitation des technologies de « récolte d'énergie » (*energy harvesting*) dans les TIC ;
- développer des méthodes de prévision de l'impact énergétique du déploiement des systèmes d'information en tant que système global ;
- lancer une initiative nationale « nouveaux matériaux et modèles de calcul » pour identifier des technologies numériques ayant une consommation faible d'énergie ;
- développer des actions favorisant l'usage des TIC dans l'industrie pour mesurer, prévoir et réduire la consommation d'énergie ;
- poursuivre activement les actions déjà initiées pour favoriser l'usage des TIC dans tous les secteurs industriels et de services pour accroître l'efficacité énergétique de l'économie.

Géo-ingénierie

- soutenir et financer les recherches sur l'analyse des techniques de géo-ingénierie dites « de seconde intention », qui représentent un risque limité par rapport aux bénéfices attendus et pourraient bénéficier d'un modèle économique plus favorable dès lors que la composante climatique pourrait être valorisée ;
- au plan général, poursuivre les recherches sur les méthodes de géo-ingénierie, permettant aussi de maintenir une expertise nationale.

L'Académie des technologies considère toutefois qu'il ne peut s'agir, dans l'état actuel des connaissances, de solutions alternatives à l'atténuation, voire à l'adaptation.

Emplois, compétences et formations

- créer des chaires centrées sur la théorie économique de l'économie circulaire et sur l'enseignement des pratiques des analyses du cycle de vie, afin de mettre en évidence la monétisation des externalités de ces nouvelles pratiques ;
- intégrer l'écotechnologie dans les enseignements des filières d'enseignement général au lycée ; intégrer les biotechnologies dans les enseignements professionnels et technologiques ;
- encourager les innovations pédagogiques à même d'accompagner la prise en compte du développement durable dans la diversité des métiers directement concernés.

Recommandations générales

Au-delà de ces recommandations sectorielles, plusieurs recommandations générales sont émises dans ce rapport. Il s'agit notamment :

- de chiffrer le rapport coût /bénéfice de chaque solution technologique et de raisonner en bilans généralisés ;
- d'attacher un prix à la tonne de CO₂ - équivalent économisée ;
- de rééquilibrer le principe de précaution en lui ajoutant les conséquences de l'inaction.

Tous secteurs confondus, il s'agit :

- pour le développement des technologies : de mobiliser les financements privés et développer des programmes collectifs de recherche et développement ;

- d'appréhender l'économie des technologies déployées, en fonction de la quantité de GES évité ou capturé, de manière à avoir dans chaque cas un coût du carbone évité ; de développer les modèles économiques pour chaque technologie en incluant les conséquences sur l'emploi et sur la balance commerciale de la France ;
- pour mobiliser le potentiel technologique au sein des économies émergentes : de mettre en place une coopération internationale favorisant le transfert de technologies et des connaissances ainsi que les financements, les compétences et les capacités d'innovation locales ;
- d'avoir constamment à l'esprit que l'évolution du climat résulte des dynamiques conjointes de systèmes complexes : géophysiques, bio-écologiques, économiques et sociaux. Il faut donc être très attentif à toute simplification abusive, à la sensibilité de tels systèmes, non linéaires, aux diverses incertitudes afférentes, sinon les conséquences de certaines actions peuvent être non attendues. D'où la nécessité d'avoir des approches interdisciplinaires et systémiques, de concevoir des actions multifactorielles et des suivis précis pour corriger le cap si nécessaire en s'appuyant, si possible, sur des modèles pour anticiper les réponses de ces systèmes (gestion adaptative).

À cette liste, l'Académie des technologies ajoute les deux recommandations suivantes :

- porter une attention particulière aux messages à faire passer aux jeunes générations. Cette préoccupation concerne l'ensemble des technologies à développer/déployer pour faire face aux défis énergie/environnement. Un effort de pédagogie est en effet indispensable pour expliquer les problèmes, les enjeux et les solutions envisageables ;
- favoriser la diffusion, vers les ingénieurs et les futurs ingénieurs, des études portant sur les solutions technologiques et leur agencement pour faire face au changement climatique. Il est en effet essentiel que de telles études trouvent audience parmi ces acteurs du développement et du déploiement technologique.

En cette année de présidence française de la COP21, l'Académie des technologies s'est elle-même donné l'objectif de poursuivre d'ici l'automne 2016 des travaux approfondis sur un certain nombre des thèmes évoqués. Elle souhaite que ces travaux accompagnent les prochaines étapes de construction et de mise en œuvre d'une politique mondiale sur le climat, à commencer par la préparation de la COP22.

Annexes

Annexe I – PANORAMA GÉNÉRAL ET ORDRES DE GRANDEUR

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) dans ses rapports 2013 et 2014 [62] [63], fait état des observations suivantes, aujourd'hui fondées sur plusieurs décennies de mesures dans tous les milieux :

- une augmentation de la température moyenne de la surface de la Terre de 0,85 °C entre 1880 et 2012 ;
- une diminution des glaciers sur les continents, une réduction des nappes glaciaires du Groenland, de la banquise arctique, de l'antarctique et des neiges de printemps de l'hémisphère nord ;
- un réchauffement des 700 premiers mètres¹⁸ des océans et une augmentation permanente de l'énergie stockée dans les océans, une augmentation constante du niveau de la mer (20 cm depuis le début du XX^e siècle), essentiellement par dilatation thermique ;
- une augmentation accélérée des concentrations de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère ;
- une augmentation du CO₂ en solution dans les océans avec acidification des eaux.

L'origine anthropique des gaz à effet de serre, les plus importants des facteurs de forçage positif, est attestée par les bilans nationaux d'émission et par la corrélation entre l'évolution du CO₂ atmosphérique et la diminution simultanée de l'oxygène atmosphérique, dans des proportions stœchiométriques liées à la combustion et à la photosynthèse.

Les principaux facteurs, anthropiques ou non, agissant sur la température sont représentés sur la figure A.1.1. Les climatologues les expriment en terme de forçage radiatif (W/m²).

Les émissions globales

Les émissions globales de gaz à effet de serre pour l'année 2010 ont été de 49 Gt eq. CO₂ (Gigatonne équivalent CO₂) [62] dont 38 d'origine anthropique, et 32 pour le seul CO₂ (cf. figure A.1.2). Pour l'année 2014, cette dernière valeur est montée à 37 Gt CO₂ [64]. En 2011, l'Union européenne a émis pour sa part 3,6 Gt CO₂ et la France 0,34 Gt CO₂ [64]. Plus généralement, la figure A.1.2 indique les émissions pour l'ensemble des GES.

Les scénarios du GIEC (2013) constituent la première étude de géo-ingénierie de la planète exprimée en terme d'accroissement de température en fonction du stock eq. CO₂ atmosphérique (cf. tableaux A.1.1 et A.1.2).

Les activités économiques et leur décarbonisation

La répartition des émissions des divers secteurs montre la prépondérance de l'énergie, de l'industrie, des transports et la contribution des émissions liées à la dégradation des sols. La répartition par secteur pour la France est atypique du fait de la prépondérance de l'électricité nucléaire et du peu d'émissions de CO₂ associées. Le secteur énergie y figure pour 11,7 % en 2012 [63], le secteur transports pour 27,8 %, l'industrie manufacturière pour 17,6 %, et l'agriculture pour 21 % [65].

¹⁸ Les 700 premiers mètres sont les plus accessibles aux mesures. Des sondages plus profonds laissent à penser que le réchauffement s'étend aussi progressivement aux couches inférieures.

La croissance mondiale des émissions des secteurs énergie fossile et ciment est toujours forte (cf. figure A.1.6).

Depuis plusieurs décennies, un découplage progressif entre l'économie et les émissions de CO₂ était apparu. Cependant, cette tendance se ralentit depuis quelques années, par l'effet du recours accru au charbon.

L'activité industrielle et de service et l'économie individuelle sont deux facteurs conjugués importants. La connectivité numérique se révélera probablement comme un facteur majeur d'évolution en masse des pratiques et devrait conduire à accroître l'efficacité énergétique de ces activités.

Le niveau du stock et le parcours d'ici 2100 dépendent de choix de politique mondiale, objet de la COP21. Les techniques d'atténuation envisageables font l'objet des chapitres suivants.

Figures et tableaux

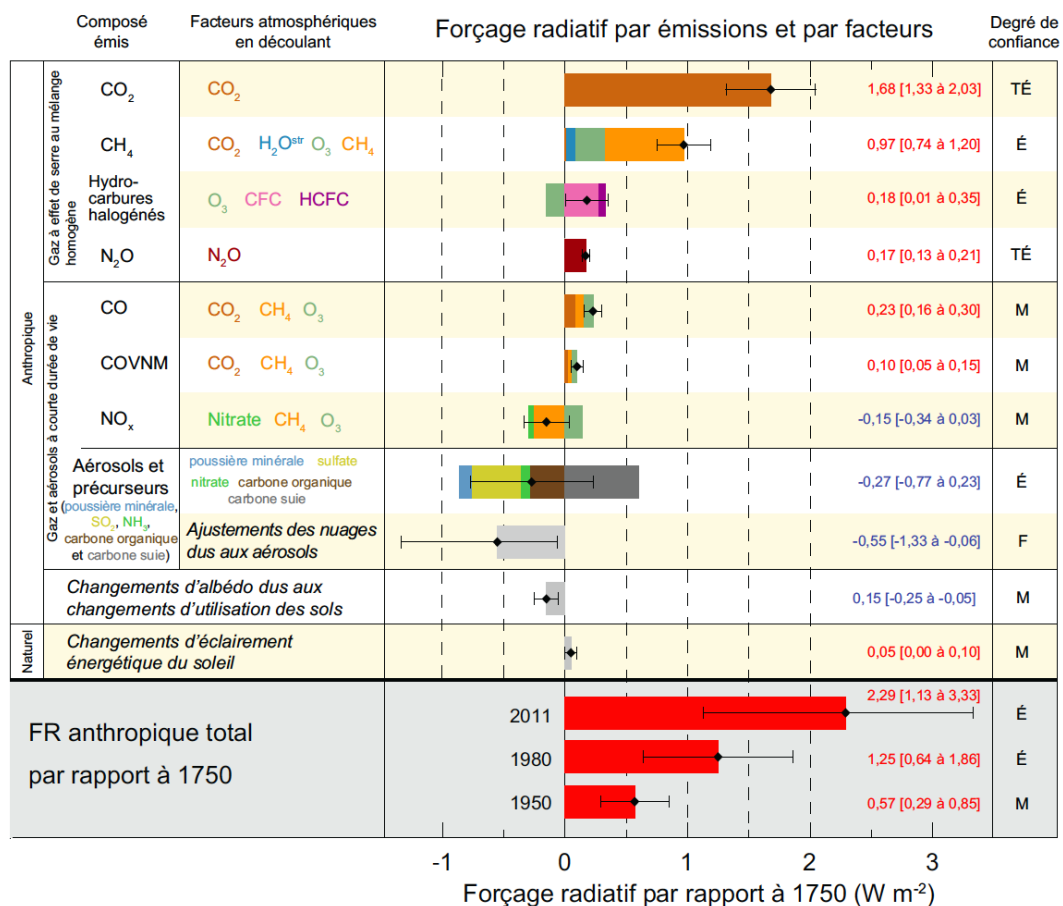


Figure RID.5 | Estimations du forçage radiatif en 2011 par rapport à 1750 et incertitudes agrégées associées concernant les principaux facteurs du changement climatique. Les valeurs sont des moyennes du forçage radiatif global (FR¹⁴), réparties selon les composés émis ou les processus qui aboutissent à une combinaison de facteurs. Les meilleures estimations du forçage radiatif net sont présentées sous la forme d'un losange noir avec les intervalles d'incertitude correspondants; les valeurs numériques sont fournies sur la droite de la figure de même que le degré de confiance (TÉ – très élevé, É – élevé, M – moyen, F – faible, TF – très faible). Le FR des carbonés suies inclut le forçage de l'albédo induit par la présence de carbone suie sur la neige ou la glace. Les faibles forçages dus aux traînées de condensation (0,05 W m⁻², incluant les cirrus produits par ces traînées) aux HFC, aux PFC et aux SF₆ (total 0,03 W m⁻²) ne sont pas présentés. Il est possible d'obtenir le FR des gaz basés sur leurs concentrations en faisant la somme des bandes de même couleur. Le forçage des volcans n'est pas inclus en raison de sa nature épisodique qui rend difficile sa comparaison aux autres mécanismes de forçage. Le forçage radiatif anthropique total est indiqué pour trois années différentes par rapport à 1750. Pour obtenir davantage de détails techniques, y compris les intervalles d'incertitude associés aux différentes composantes et aux différents processus, voir les annexes du Résumé technique. [8.5; figures 8.14 à 8.18; figures RT.6 et RT.7]

Figure A.1.1 : Estimation du forçage radiatif en 2011 par rapport à 1750

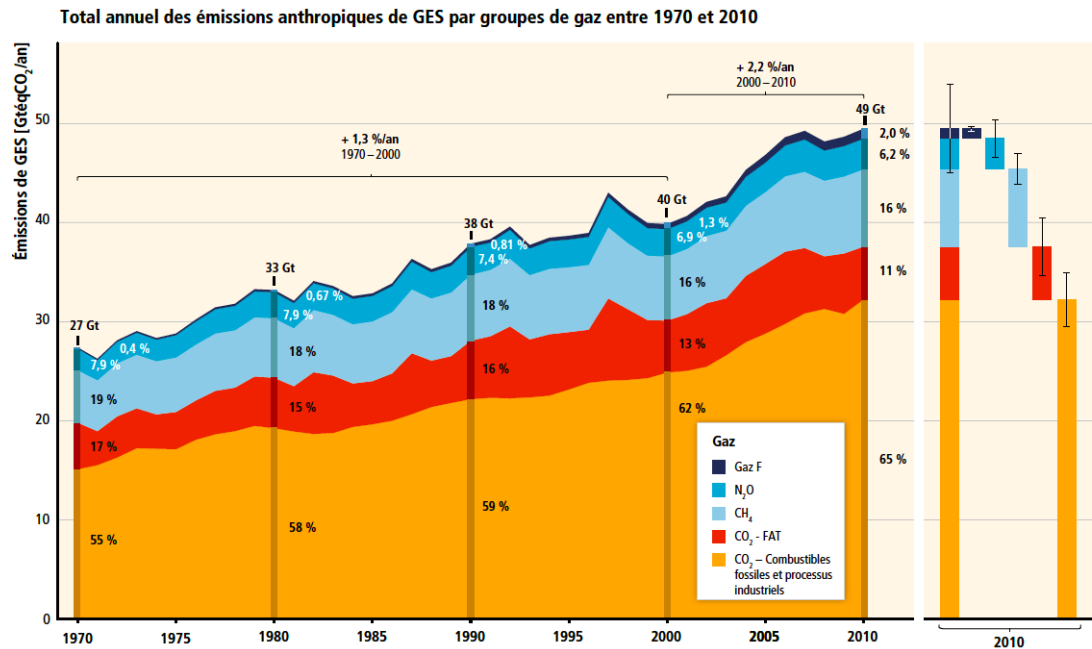


Figure RID.1 Total annuel des émissions anthropiques de GES (Gt_{eq}CO₂/an) par groupes de gaz entre 1970 et 2010: CO₂ issu de la combustion de combustibles fossiles et des processus industriels; CO₂ issu de la foresterie et autres affectations des terres (FAT); méthane (CH₄); oxyde nitreux (N₂O); gaz fluorés⁸ (gaz F) réglementés en vertu du protocole de Kyoto. Sur la droite de la figure, les émissions de GES de 2010 sont reprises, également décomposées, avec les incertitudes associées aux divers groupes (intervalle de confiance de 90 %) sous forme de barres d'erreur. Les incertitudes portant sur le total des émissions anthropiques de GES sont obtenues à partir des estimations des divers gaz décrites dans le chapitre 5 [5.2.3.6]. Les émissions mondiales de CO₂ provenant de la combustion de carburants fossiles sont déterminées avec une incertitude de 8 % (intervalle de confiance de 90 %). De très grandes incertitudes, de l'ordre de ± 50 %, sont associées aux émissions de CO₂ provenant de la foresterie et autres affectations des terres (FAT). Les incertitudes correspondant aux émissions mondiales de CH₄, de N₂O et de gaz F sont estimées respectivement à 20 %, 60 % et 20 %. L'année 2010 est l'année la plus récente pour laquelle des statistiques sur les émissions de tous les gaz ainsi que l'évaluation des incertitudes étaient quasiment complètes à la date d'échéance pour la rédaction du rapport. Toutes les émissions sont exprimées en Gt_{eq}CO₂ sur la base du PRG₁₀₀⁶ à compter de la parution du deuxième Rapport d'évaluation du GIEC. Les données relatives aux émissions provenant de la FAT correspondent aux émissions de CO₂ d'origine terrestre, provoquées par les feux de forêt et de tourbière ainsi que par la décomposition dans les tourbières; elles se rapprochent des flux nets de CO₂ attribués à la FAT, que décrit le chapitre 11 du présent rapport. Les taux de croissance annuels moyens sont indiqués pour différentes périodes signalées par des accolades horizontales. [figure 1.3, figure RT.1]

Figure A.1.2 : Historique des émissions de GES

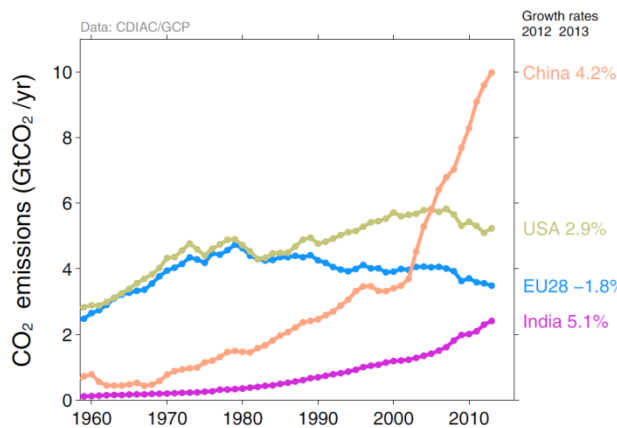


Figure A.1.3. Émissions de CO₂ par grand contributeur [62] [66]

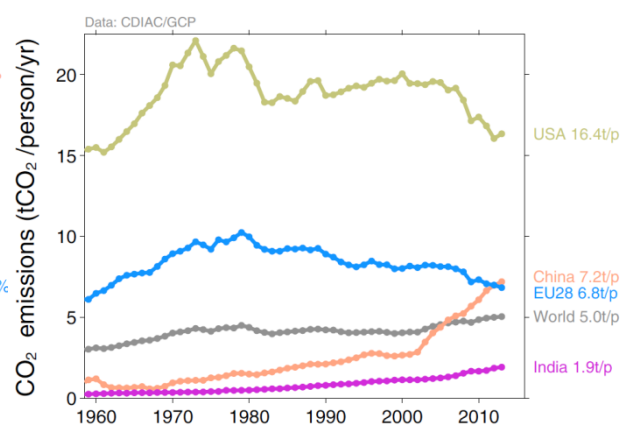


Figure A.1.4. Émissions de CO₂ par habitant [62] [66]

Répartition des émissions de GES entre les secteurs économiques

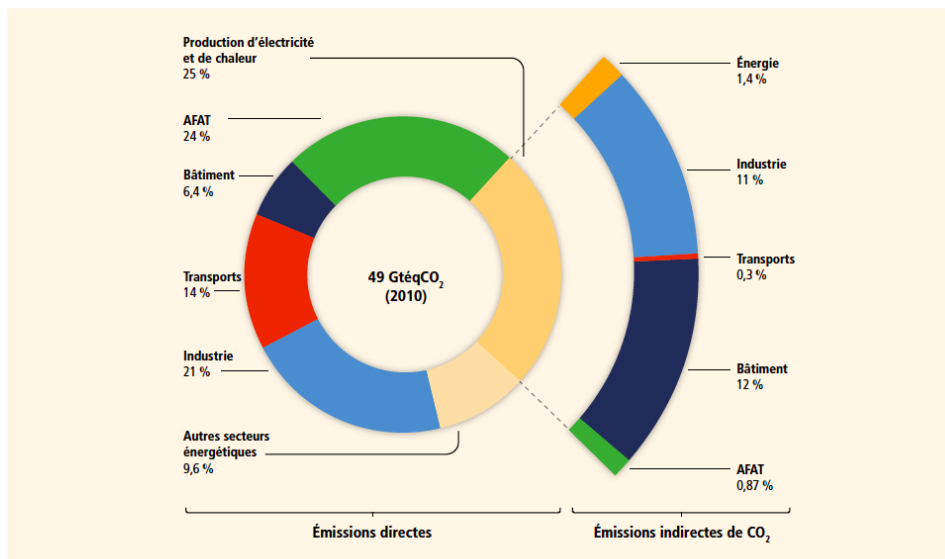


Figure RID.2 | Répartition de l'ensemble des émissions anthropiques de GES (GtqCO₂/an) entre les secteurs économiques. La couronne montre les parts (en pourcentage des émissions anthropiques totales de GES) des émissions directes de GES attribuées en 2010 à cinq secteurs économiques. L'arc agrandi sur la droite indique la répartition des émissions indirectes de CO₂ découlant de la production d'électricité et de chaleur entre les secteurs qui consomment l'énergie finale. La part attribuée aux «autres énergies» correspond à toutes les sources d'émission de GES dans le secteur de l'énergie, comme il est défini dans l'annexe II, autres que la production d'électricité et de chaleur [A.II.9.1]. Les données relatives aux émissions provenant de l'AFAT (agriculture, foresterie et autres affectations des terres) correspondent aux émissions de CO₂ d'origine terrestre, provoquées par les feux de forêt et de tourbière ainsi que par la décomposition dans les tourbières; elles se rapprochent des flux nets de CO₂ attribués à la FAT (foresterie et autres affectations des terres), que décrit le chapitre 11 du présent rapport. Toutes les émissions sont exprimées en GtqCO₂ sur la base du PRG₁₀₀⁶ à compter de la parution du deuxième Rapport d'évaluation du GIEC. Les secteurs sont définis dans l'annexe II, à la section 9. [figure 1.3a, figure RT.3 a/b]

Figure A.1.5 : Répartition par secteur des émissions mondiales

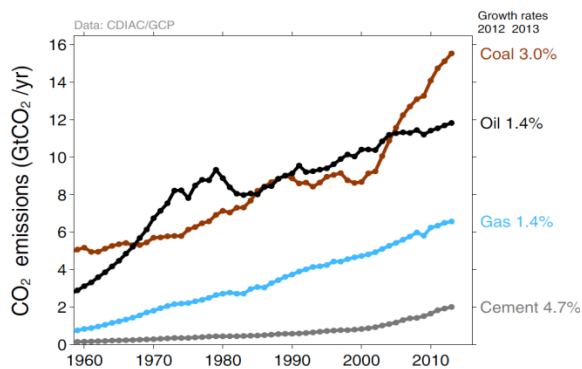


Figure A.1.6. Évolution globale des contributions majeures liées à l'énergie

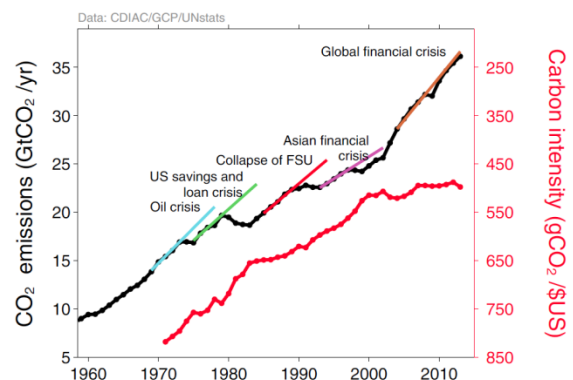


Figure A.1.7. En noir : émissions mondiales de CO₂. En rouge : Intensité carbone par dollar (2005) de PIB. L'échelle en rouge croît vers le bas

LES TECHNOLOGIES ET LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Tableau RID.3 | Émissions cumulées de CO₂ pour la période 2012-2100 compatibles avec les concentrations atmosphériques simulées pour les RCP par les modèles de système Terre. {6.4, tableau 6.12, figure RT.19}

Scénario	Émissions cumulées de CO ₂ pour 2012-2100 ^a			
	GtC		GtCO ₂	
	Moyenne	Plage	Moyenne	Plage
RCP2,6	270	140 à 410	990	510 à 1 505
RCP4,5	780	595 à 1005	2 860	2 180 à 3 690
RCP6,0	1 060	840 à 1250	3 885	3 080 à 4 585
RCP8,5	1 685	1 415 à 1 910	6 180	5 185 à 7 005

Note:

^a 1 gigatonne de carbone (GtC) = 10¹⁵ grammes de carbone (gC). Cela correspond à 3,667 GtCO₂.

Tableau A.1.1 : Émissions cumulées de CO₂ pour la période 2012-2100 compatibles avec les concentrations atmosphériques simulées pour les profils représentatifs d'évolution de concentration de GES (Representative Concentration Pathways, RCP) par les modèles de Système Terre

		2046–2065		2081–2100	
	Scénario	moyenne	plage probable ^c	moyenne	plage probable ^d
Évolution de la température moyenne à la surface du globe (°C) ^a	RCP2,6	1,0	0,4 à 1,6	1,0	0,3 à 1,7
	RCP4,5	1,4	0,9 à 2,0	1,8	1,1 à 2,6
	RCP6,0	1,3	0,8 à 1,8	2,2	1,4 à 3,1
	RCP8,5	2,0	1,4 à 2,6	3,7	2,6 à 4,8
	Scénario	moyenne	plage probable ^c	moyenne	plage probable ^d
Élévation du niveau moyen des mers (m) ^b	RCP2,6	0,24	0,17 à 0,32	0,40	0,26 à 0,55
	RCP4,5	0,26	0,19 à 0,33	0,47	0,32 à 0,63
	RCP6,0	0,25	0,18 à 0,32	0,48	0,33 à 0,63
	RCP8,5	0,30	0,22 à 0,38	0,63	0,45 à 0,82

Notes:

- ^a Basé sur l'ensemble CMIP5; anomalies calculées par rapport à la période 1986–2005. À l'aide de l'ensemble HadCRUT4 et de son estimation de l'incertitude (intervalle de confiance de 5–95 %), le réchauffement observé pour la période de référence 1986–2005 utilisée pour les projections est de 0,61 [0,55 à 0,67] °C par rapport à 1850–1900 et de 0,11 [0,09 à 0,13] °C par rapport à 1980–1999, soit la période de référence utilisée dans le RE4. Les plages probables n'ont pas été évaluées par rapport aux périodes de références précédentes, car en général la littérature ne propose pas de méthode qui permette de combiner les incertitudes des modèles et des observations. L'ajout de changements projetés et observés ne tient compte ni des effets potentiels des erreurs systématiques des modèles à comparer aux observations ni de la variabilité naturelle interne au cours de la période de référence des observations. (2.4.3 ; Tableaux 12.2 et 12.3)
- ^b Basée sur 21 modèles CMIP5; anomalies calculées par rapport à la période 1986–2005. Lorsque les résultats de CMIP5 n'étaient pas disponibles pour un MCGAO (modèle de circulation générale océan-atmosphère) et un scénario particuliers, ces résultats étaient estimés de la manière exposée dans le tableau 13.5 au chapitre 13. Les contributions du changement de dynamiques rapides des calottes glaciaires et du stockage anthropique de l'eau dans les terres émergées sont traitées comme ayant des distributions de probabilité uniformes et comme étant en grande partie indépendantes du scénario. Ce traitement n'implique pas que les contributions concernées ne dépendront pas du scénario suivi, mais seulement que l'état actuel des connaissances ne permet pas une évaluation quantitative de cette dépendance. En l'état actuel des connaissances, seul l'effondrement de secteurs marins de la calotte glaciaire de l'Antarctique, si celui-ci était provoqué, pourrait faire monter de manière importante le niveau moyen de mers au-dessus de la plage probable au cours du XXI^e siècle. On peut affirmer avec un *degré de confiance moyen* que cette contribution supplémentaire ne représenterait pas une augmentation du niveau des mers supérieure à plusieurs dixièmes de mètre au cours du XXI^e siècle.

Tableau A.1.2 : Évolution projetée de la moyenne de la température de l'air à la surface du globe et de l'élévation du niveau moyen des mers pour le milieu et la fin du XXI^e siècle

Annexe II – LE PRIX DU CARBONE DES ÉCONOMISTES

Depuis plus de vingt ans, les économistes, pour une fois presque tous d'accord, mettent en avant les avantages de l'instauration d'un prix du carbone [68].

Ils considèrent que c'est la façon la plus efficace de guider les comportements des acteurs économiques dans le cadre de la politique climatique.

Les émissions de gaz à effet de serre en général et de dioxyde de carbone en particulier engendrent des dommages environnementaux actuels ou futurs qui se traduisent par des coûts pour la collectivité. En l'absence d'intervention publique, ces coûts ne sont pas répercutés sur les acteurs responsables des émissions. Par conséquent, ceux-ci sont incités à émettre au-delà du niveau optimal pour la collectivité. Les économistes qualifient ces coûts d'externalités négatives.

Le prix du carbone aurait l'avantage, une fois intégré à l'ensemble des prix, d'être pris en compte par les acteurs économiques dans leurs décisions, en fonction de leur intérêt privé, sans qu'il soit besoin qu'ils y soient exhortés par les responsables politiques ou les associations militantes. Selon un schéma idéal, le simple jeu des comportements économiques va dès lors se rapprocher de l'optimum collectif : la mobilisation en faveur du climat s'opérera d'elle-même. L'innovation technologique pourra alors être guidée par ce repère.

Non seulement les réductions d'émissions de gaz à effet de serre seront mises en œuvre, mais elles le seront dans l'ordre le plus efficace, en commençant par celles qui sont les moins coûteuses.

Taxe ou marché de permis ?

Il y a deux façons d'instaurer un prix du carbone : une taxe ou un marché de permis. Au début des années quatre-vingt-dix, le débat faisait rage. Chaque méthode a ses avantages et ses inconvénients. Depuis, les positions des différents acteurs ont varié : les Européens, initialement plutôt favorables à la taxe, ont mis en place le marché de permis, appelé « EU ETS » (*Emissions Trading Scheme* de l'Union européenne). L'option de la taxe a pour sa part donné lieu à de nombreuses réalisations dans différents pays et garde de solides arguments [69]. En France, notamment, la contribution climat énergie mise en œuvre depuis 2014 pourrait progressivement prendre une place significative.

Cependant c'est bien l'option des marchés de permis qui a connu les plus importants développements. Notamment l'ETS européen couvre 31 pays (Union européenne, plus Islande, Liechtenstein et Norvège) où les émissions de 11 000 installations y sont assujetties, qui représentent 45 % des émissions totales de cette zone.

Pourquoi cette préférence, au moins jusqu'ici et pour la partie de l'économie sur laquelle une mesure des émissions est possible, en faveur de l'option du marché de permis ? Sans que ce soit tout à fait clair, il semble que deux raisons aient fortement joué. D'une part, l'objectif visé, sur les conseils des scientifiques, est défini en volume d'émission et l'option du marché de permis est très adaptée à la définition d'un objectif ainsi spécifié : le plafonnement (*cap*) du dispositif établissant un système de plafonnement et de quotas (*Cap and Trade*) s'en déduit en effet directement. D'autre part, la fiscalité est fondamentalement un instrument national, y compris au sein de l'Union européenne. Or les propriétés d'optimalité d'un prix du carbone ne se manifestent vraiment que si ce prix est unique à travers les pays.

Un avantage important du marché du carbone par rapport à une politique de subventions ou de prix d'achats garantis et bonifiés est qu'il donne explicitement un prix aux émissions évitées alors dans bien des cas, la

subvention correspond à un prix de carbone bien supérieur au prix de l'ETS ce qui perturbe le système et donne un signal social perturbateur.

Les enseignements du marché européen

La phase I de ce marché, l'ETS, a démarré au 1^{er} janvier 2005, la phase II au 1^{er} janvier 2008 et la phase actuelle, qui va s'étaler jusqu'en 2020, au 1^{er} janvier 2013. Cette dizaine d'années d'expérience a apporté de nombreux enseignements.

1°) Techniquement le système fonctionne bien. Sous réserve de quelques fraudes liées à des défauts de jeunesse, son fonctionnement a été étonnamment fluide. Le système a pu voir diminuer progressivement la part des quotas gratuits et corrélativement s'adjoindre des enchères carbone. Des dispositifs *ad hoc* ont pu le rendre tolérable pour les branches intensives en carbone en concurrence avec des pays ne contraignant pas les émissions sans ébranler l'ensemble de la construction.

2°) En revanche, les crédits internationaux, qui permettent de comptabiliser des réductions d'émissions réalisées entre pays de l'annexe 1 – pays développés dont la Russie – (MOC, mise en œuvre conjointe) et dans les pays hors annexe I – pays en développement dont la Chine, l'Inde (MDP, mécanismes de développement propre), ont fonctionné de façon peu convaincante, pour un coût élevé et au bénéfice de quelques acteurs seulement [70].

3°) Depuis maintenant plusieurs années, le prix du carbone dégagé par le marché européen est faible, de l'ordre de six euros la tonne, et en tout cas insuffisant pour influencer les décisions d'investissement des entreprises [71] et pour procurer des recettes publiques d'un ordre de grandeur significatif. Cette situation insatisfaisante résulte, pour une part et tout à fait normalement de la conjoncture dégradée de la période, mais aussi des interactions entre l'ETS et les autres politiques climatiques, interactions qui avaient été mal anticipées.

Le délicat problème des interactions

Dans un système *Cap and Trade*, il est possible de prendre en compte différentes politiques pour choisir le niveau du *cap*. Mais, ensuite, le niveau des émissions respectera ce niveau quoi qu'il arrive, quelles que soient notamment les autres politiques climatiques mises en œuvre. Il en résulte une conséquence souvent incomprise des décideurs politiques : les initiatives supplémentaires prises dans le champ de l'ETS ne modifient en rien le niveau d'émissions et ont pour seul effet d'abaisser le prix du carbone sur le marché. Les réductions d'émissions que les acteurs mettent en œuvre en réaction au prix sont en général peu visibles, comme la main d'Adam Smith, et les décideurs politiques sont donc tentés de leur ajouter des initiatives visibles, propres à concrétiser pour le public la politique climatique. Il ne faut pas en abuser, au risque de voir le prix du carbone rester en permanence proche de zéro.

Un système de marché de permis assure à lui seul la réalisation de l'objectif visé en mettant le prix au niveau requis. Symétriquement, il supporte très mal l'adjonction de politiques non anticipées poursuivant le même objectif sur le même périmètre. Par ailleurs, ces politiques ajoutées sont probablement moins efficaces que les réductions d'émissions résultant du jeu du marché.

La croissance verte et ses opportunités

La politique climatique bouscule l'économie. Elle y ajoute des coûts, par exemple ceux liés à l'émission de carbone, et passe aussi par des réglementations qui contraignent les possibilités des entreprises.

Se pourrait-il que ces coûts et ces contraintes supplémentaires se traduisent *in fine* par des bienfaits économiques ?

Nombreux sont ceux qui l'affirment, mais rien n'est moins sûr [72]. Pour que des coûts et des contraintes supplémentaires puissent entraîner une amélioration économique, il faut supposer une sous-optimalité de la situation de départ d'une ampleur peu probable. Ainsi l'allègement de la fiscalité sur le travail que pourrait autoriser un alourdissement de la fiscalité environnementale ne sera-t-il susceptible de permettre d'espérer un double dividende que si la fiscalité du travail était initialement extrêmement éloignée de l'optimum.

Cela dit, l'objectif principal des politiques climatiques est de réduire les flux d'émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Elles peuvent probablement y parvenir grâce à une facturation du carbone combinée de façon maîtrisée à des mesures réglementaires. Ce serait déjà un succès considérable, même si les questions de croissance, d'emploi et d'inégalités continueraient à se poser par ailleurs.

Dans la grande mutation qui s'engage, il y aura des gagnants et des perdants. Les entreprises et les pays les plus innovants et les plus compétitifs dans le champ de la politique climatique verront leur situation progresser. Ce sont eux qui feront la croissance verte.

Recommandations

La plate-forme « énergie » d'Euro-CASE (groupe de toutes les académies d'engineering et de technologies européennes) propose une réforme significative de l'EU ETS dans le but qu'il joue réellement son rôle [74]. Elle propose notamment d'inclure un couloir de prix (un prix minimum et un prix maximum de la tonne de CO₂ émis) qui donne un signal ferme aux acteurs industriels. Les études faites ont convaincu les participants que l'action sur les quantités ne suffirait pas et qu'il est nécessaire d'introduire explicitement un signal sur le prix. Le rapport propose également d'élargir rapidement le système EU ETS à d'autres secteurs majeurs comme le transport et le chauffage, et de traiter les problèmes de fuite de carbone (le contenu carbone des produits importés) en élargissant le groupe de pays participants au système EU ETS.

Liste des contributions

Document élaboré par un groupe de travail animé par Marion GUILLOU et Alain PAVÉ, avec l'appui de Lucie GOUESLAIN

Groupe de travail constitué de :

- membres de l'Académie des technologies

Jean-Claude ANDRÉ, Olivier APPERT, Jacques BLAMONT, Yves CARISTAN, Bernard DECOMPS, Jean-Louis ÉTIENNE, Erol GELENBE, Marion GUILLOU, Bruno JARRY, Paul PARNIÈRE, Alain PAVÉ, Marc PELEGRIN, Gilbert RUELLE, Christian SAGUEZ, Bernard TARDIEU

Avec les contributions de :

- membres de l'Académie des technologies

Thierry CHAMBOLLE, François de CHARENTENAY, Jean-Michel CHARPIN, Gérard GRUNBLATT, François LEFAUDEUX, Jacques LESOURNE, Ghislain de MARSILY, François MUDRY, Gérard PAYEN, Alain POUYAT, Jean-Claude RAOUL, Gérard ROUCAIROL

- membres extérieurs à l'Académie des technologies

Olivier BOUCHER (LMD), Jean DENEGRE (secrétaire scientifique de la Commission énergie et changement climatique de l'Académie des technologies), Christian GRELLIER (Bouygues Immobilier), Jean-Charles HOURCADE (CIRED)

Personnalités auditionnées dans le cadre de ce travail :

- membres de l'Académie des technologies

Jean-Claude ANDRÉ, François BERTIÈRE, Gérald BRONNER, Jean-Michel CHARPIN, Bernard DECOMPS, Jean-Louis ÉTIENNE, Erol GELENBE, Yves RAMETTE, Bernard TARDIEU

- membres extérieurs à l'Académie des technologies

Dominique ARROUAYS (Association française pour l'étude du sol), Virginie BOUTUEIL (ENPC), Hervé CHARRUE (CSTB), Agnès DUCHARNE (CNRS), Jean-François GAGNE (AIE), Françoise GAILL (CNRS), Jean-Marc GUEHL (INRA), Alain HÉNAFF (LETG), Jean-Charles HOURCADE (CIRED), Didier HOUSSIN (IFPEN), Myriam LEGAY (ONF), Valérie MASSON-DELMOTTE (CEA), François MOISAN (ADEME), Jean-Eudes MONCOMBLE (Conseil français de l'énergie), Gérard MOUTET (TOTAL), Michel PETIT (Académie des sciences), Christophe RUPP-DAHLEM (Roquette), Jean-François SOUSSANA (INRA), Thierry STADLER (Pôle IAR), Jean-Marc TOUZARD (INRA)

Sigles utilisés

ACV : Analyse du cycle de vie
AIE : Agence internationale de l'énergie
CCS : Captage/stockage de CO₂ (*Carbon capture and storage*)
CDR : Captation du dioxyde de carbone (*Carbon Dioxide Removal*)
CESE : Conseil économique, social et environnemental
CGDD : Commissariat général au développement durable
CNES : Centre national d'études spatiales
ENR : Énergies renouvelables
ENSO : *El Niño* oscillation australe (*El Niño – Southern Oscillation*)
EU ETS : *Emissions Trading Scheme* de l'Union européenne
FAO : Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture (*Food and Agriculture Organization of the United Nations*)
GCM : Modèle de circulation générale (*General Circulation Model*)
GES : Gaz à effet de serre
GHM : Modèle hydrologique global (*General Hydrological Model*)
GIEC : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
IESF : Ingénieurs et scientifiques de France
INRA : Institut national de la recherche agronomique
INSEE : Institut national de la statistique et des études économiques
IPI : Indice de production industrielle de l'INSEE
MEDDE : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie
MDP : Mécanismes de développement propre
MOC : Mise en œuvre conjointe
NAO : Oscillation nord-atlantique (*North Atlantic Oscillation*)
OCDE : Organisation de coopération et de développement économiques
PPRI : Plan de prévention des risques d'inondation
R & D : Recherche et développement
RCP : Profils représentatifs d'évolution de concentration de GES (*Representative Concentration Pathways*)
RTE : Réseau de transport d'électricité
SHOM : Service hydrographique et océanographique de la marine
SOC : Carbone organique du sol (*Soil Organic Carbon*)
SRM : Gestion du rayonnement solaire (*Solar Radiation Management*)
STEP : Station de transfert d'énergie par pompage
TIC : Technologies de l'information et de la communication
TRL : Niveau de maturité technologique (*Technology Readiness Level*)
ZEE : Zone économique exclusive

Références

- [1] Joseph Fourier. *Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires*. Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France, 1827.
- [2] Jean-Louis Dufresne. Jean-Baptiste Joseph Fourier et la découverte de l'effet de serre. *La météorologie*, 53, 42-46, 2006.
- [3] Jacques-Louis Lions. El Planeta Tierra, el papel de las matematicas y de los super ordenadores. Instituto de España, 1990. Bien d'autres références pourraient être citées concernant J.L. Lions, et sa contribution à l'école mathématique française. Mais ses contributions ne se sont pas limitées là, notamment en termes de modélisation et d'environnement, cf. par exemple : Lions J.L. Modélisation mathématique et environnement. Quelques remarques. In *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement* (F. Blasco Ed.). Elsevier, Paris, 1997, 79-90. De plus, cette publication en espagnol montre l'ouverture culturelle et scientifique dont il pouvait faire preuve. Il a été l'un des premiers à souligner le rôle pionnier de Fourier, notamment dans cet ouvrage.
- [4] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [C.B Field., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp.
- [5] McKinsey & Company, Pathways to a low carbon economy, Version 2 of the Global Greenhouse Gas Abatement Cost Curve, 2009.
- [6] Y. Pan, R.A Birdsey, J. Fang, R. Houghton, P.E. Kauppi, W.A. Kurz, O.L. Phillips, A. Shvidenko, S.L. Lewis, J.G. Canadell, P. Ciais, R.B. Jackson, S.W. Pacala, A.D. McGuire, S. Piao, A. Rautiainen, S. Sitch, and D. Hayes, A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333, 988-993, 2011.
- [7] Pellerin,S., Bamière,L., Angers,D., Béline,F., Benoît,M., Butault,J.P., Chenu,C., Colnenne-David,C., De Cara,S., Delame,N., Doreau,M., Dupraz,P., Faverdin,P., Garcia-Launay,F., Hassouna,M., Hénault,C., Jeuffroy,M.H., Klumpp,K., Metay,A., Moran,D., Recous,S., Samson,E., Savini,I., Pardon L., Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA, 2013.
www6.paris.inra.fr/dpe/publications/rapports-et-syntheses
- [8] Académie des technologies, Rapport *Le méthane : d'où vient-il et quel est son impact sur le climat ?*, EDP Sciences 2014.
- [9] Arrouays, D., Deslais, W. and Badeau, V., The carbon content of topsoil and its geographical distribution in France, *Sol Use and Management*, 17, 7-11, doi: 10.1111/j.1475-2743.2001.tb00002.x, 2001.
- [10] Meersmans, Manuel Martin, Lacarce, De Baets, Jolivet, et al. A high resolution map of French soil organic carbon. *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag (Germany), 32 (4), pp.841-851, 2012.
- [11] CITEPA (Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique), Rapport national d'inventaire pour la France au titre de la convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques et du protocole de Kyoto, édition de mars 2012.
- [12] ONERC (Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique), Climat de la France au XXI^e siècle [Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S., Vautard, R., sous la direction de Jean Jouzel].
- [13] IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, doi:10.1017/CB09781107415324. Chapters 3, 10, 13.
- [14] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp. Chapters 3, 4, 5, 6.
- [15] Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., Arnell, N. W., Clark, D. B., Dankers, R., Eisner, S., Fekete, B.M., Colón-González, F.J., Gosling, S.N., Kim, H., Liu, X., Masaki, Y., Portmann, F.T., Satoh, Y., Stacke, T., Tang, Q., Wada, Y., Wisser, D., Albrecht, T., Frieler, K., Piontek, F., Warszawski, L., and Kabat, P., Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *PNAS*, 111 : 9, 3245 – 3250, 2014.

- [16] Hoekstra, A., and Mekonnen, M., The water footprint of humanity, *PNAS*, 109, 3232-3237, 2012.
www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1109936109
- [17] Marsily, G. de, L'eau, une ressource renouvelable convoitée et inégalement répartie, *Ann. Soc. Géol. du Nord*, T22 (2^e série), 2015.
- [18] Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., and Palutikof, J.P. (Eds.), *Climate Change and Water*, Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp, 2008.
- [19] Marie Bellanger, Analyse de l'évolution des chroniques de flux liquides dans les bassins du Congo et de l'Orénoque, rapport de stage de licence 3 à l'IRD, 2012.
- [20] Wesselink, A. J., Orange, D., Feizoure, C.T. and Randriamiarisoa, Les régimes hydroclimatiques et hydrologiques d'un bassin versant de type tropical humide : l'Oubangui (République Centrafricaine), *L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement* (Actes de la conférence de Paris, mai 1995), *IAHS Publ*, no. 238, 1996.
- [21] Emmanuel Le Roy Ladurie, *Histoire humaine et comparée du climat* – volume 1, Éditions Fayard, 2004.
- [22] Zachos, J.C., Dickens, G.R., and Zeebe, R.E., An early Cenozoic perspective on greenhouse warming and carbon-cycle dynamics *Nature*, 451, 279-283, 2008.
- [23] Schmidt-Lainé, C., et Pavé, A., Environnement : modélisation et modèles pour comprendre, agir et décider dans un contexte interdisciplinaire. *Natures, Sciences, Sociétés : Sciences pour l'ingénierie de l'environnement* 10 : s.1, 5-25, 2002.
- [24] Le Quéré, C., Peters, G. P., Andres, R. J., Andrew, R. M., Boden, T., Ciais, P., Friedlingstein, P., Houghton, R. A., Marland, G., Moriarty, R., Sitch, S., Tans, P., Arneeth, A., Arvanitis, A., Bakker, D. C. E., Bopp, L., Canadell, J. G., Chini, L. P., Doney, S. C., Harper, A., Harris, I., House, J. I., Jain, A. K., Jones, S. D., Kato, E., Keeling, R. F., Klein Goldewijk, K., Körtzinger, A., Koven, C., Lefèvre, N., Omar, A., Ono, T., Park, G.-H., Pfeil, B., Poulter, B., Raupach, M. R., Regnier, P., Rödenbeck, C., Saito, S., Schwinger, J., Segsneider, J., Stocker, B. D., Tilbrook, B., van Heuven, S., Viovy, N., Wanninkhof, R., Wiltshire, A., Zaehle, S., and Yue, C., Global carbon budget 2013, *Earth Syst. Sci. Data Discuss.*, 6:689-760, doi:10.5194/essdd-6-689-2013, 2013.
- [25] Monaco, A., et Prouzet, P., (dir.), *Risques côtiers et adaptation des sociétés*, ISTE édition, coll. Mer et Océan, Londres, 2014. (Dans cet ouvrage : Alain Miossec, Le littoral entre nature et société, un patrimoine en mutation, p. 197-240 ; Alexandre Magnan, De la vulnérabilité à l'adaptation au changement climatique : éléments de réflexion pour les sciences sociales, p. 241-274).
- [26] Convention des Nations unies sur le droit de la mer (avec annexes, acte final et procès-verbaux de rectification de l'acte final en date des 3 mars 1986 et 26 juillet 1993). Conclue à Montego Bay le 10 décembre 1982.
http://www.un.org/depts/los/convention_agreements/texts/unclos/unclos_f.pdf
- [27] Lucien Laubier, L'émergence de l'océanographie au CNRS : les conditions de la pluridisciplinarité, *La revue pour l'histoire du CNRS*, 2002. <http://histoire-cnrs.revues.org/3661>
- [28] Jean-Louis Fisher, Créations et fonctions des stations maritimes françaises, *La revue pour l'histoire du CNRS*, 2002. <http://histoire-cnrs.revues.org/537>
- [29] Alain Pavé, Les moyens lourds de la recherche : un exemple de « développement durable » pour la science. *La revue pour l'histoire du CNRS*, 2005. <http://histoire-cnrs.revues.org/1277>
- [30] Alain Hénaff, « Dynamiques littorales et risques côtiers », intervention à l'Académie des technologies le 11 mars 2015.
- [31] Marc Pavé, *La pêche côtière en France : 1715-1850. Approche sociale et environnementale*, L'Harmattan, Paris, 2013.
- [32] Françoise Gaill, « COP 21 : on a oublié d'inviter l'océan ! », *CNRS Le Journal*, juin 2015. <https://lejournel.cnrs.fr/billets/cop-21-a-oublie-dinviter-locean>
- [33] SHOM : <http://www.shom.fr/les-activites/activites-scientifiques/maree-et-courants/marees/evolution-du-niveau-des-mers/>
- [34] Flotte océanographique française : <http://www.flotteoceanographique.fr/La-flotte>
- [35] Les outils de l'aménagement : <http://www.outil2amenagement.certu.developpement-durable.gouv.fr/loi-littoral-une-vue-d-ensemble-par-denis-a660.html>

Références

- [36] Ministère de l'éducation nationale, de la recherche et de la technologie, Rapport annuel sur l'évaluation de la politique nationale de recherche et de développement technologique – Avis sur la flotte océanographique française, 1998. <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/984001084.pdf>
- [37] Comité national d'évaluation de la recherche, Évaluation de la recherche en océanographie : programmes et moyens à la mer, février 1998. <http://www.ladocumentationfrancaise.fr/var/storage/rapports-publics/054000334.pdf>
- [38] Collection Mer et Océan (coordination André Mariotti, sous la direction d'André Monaco (CNRS) et Patrick Prouzet (Ifremer)) ISTE Edition, Londres.
Volume 1 : Complexité du système océanique, 292 pages - Janvier 2014.
Volume 2 : Vulnérabilité du système océanique, 392 pages - Janvier 2014.
Volume 3 : Risques côtiers et adaptations des sociétés, 368 pages - Juillet 2014.
Volume 4 : Valorisation et économie des ressources marines, 402 pages - Juillet 2014.
Volume 5 : Diversité et fonctions des systèmes écologiques marins, 430 pages - Mars 2015.
Volume 6 : Gouvernance des mers et des océans, 294 pages - Mai 2015.
Volume 7 : Outils de l'océanographie (à paraître, Mai 2016).
- [39] IEA (International Energy Agency), Key world energy statistics, IEA, Paris. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorldStatistics2015.pdf>
- [40] Commissariat général au développement durable, Chiffres clés des énergies renouvelables, Édition 2015. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Rep_-_Chiffres_cles_energies_renouvelables.pdf
- [41] IEA (International Energy Agency), Energy Technology Perspectives 2015, Mobilising innovation to accelerate climate action, IEA, Paris.
- [42] Académie des technologies, Rapport *Impact des TIC sur la consommation d'énergie à travers le monde*, EDP Sciences 2015.
- [43] ANCRE (Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie), Rapport « Decarbonization wedges », 2015. http://www.allianceenergie.fr/imageProvider.aspx?private_resource=1360&fn=DecarbonizationWedgesreport0.pdf
- [44] Commissariat général au développement durable, Bilan énergétique de la France pour 2014, 2015. http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Ref_-_Bilan_energetique_de_la_France_2014.pdf
- [45] OECD (Organization for Economic Co-operation and Development), The Bioeconomy to 2030: designing a policy agenda, 2009.
- [46] Nicholas Georgescu-Roegen *La décroissance. Entropie - Écologie - Économie* [Première édition, 1979]. Paris : Éditions Sang de la terre, 1995, 254 pp.
- [47] Colin W Clark, *Bioeconomic modelling and fisheries management*, John Wiley & Sons, New-York, 1985.
- [48] Stratégie nationale de recherche [2015]. <http://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/cid86746/strategie-nationale-recherche-rapport-propositions.html>
- [49] European Commission, Innovating for Sustainable Growth: a Bioeconomy for Europe, 2012. http://ec.europa.eu/research/bioeconomy/pdf/201202_innovating_sustainable_growth_en.pdf
- [50] Gelenbe, E., and Caseau, Y., The impact of information technology on energy consumption and carbon emissions, *ACM (Association for Computing Machinery) Ubiquity*, Vol. 2015, Issue June, Article 1, doi: 10.1145/2755977, New York, 2015. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2798337&picked=prox>
- [51] World Wild life Forum, The potential global CO₂ reductions from ICT use, Identifying and assessing the opportunities to reduce the first billion tonnes of CO₂, 2008. http://www.wwf.se/source.php/1183710/identifying_the_1st_billion_tonnes_ict.pdf
- [52] Boucher, O., Forster, P. M., Gruber, N., Ha-Duong, M., Lawrence, M. G., Lenton, T. M., Maas, A. and Vaughan, N. E., Rethinking climate engineering categorization in the context of climate change mitigation and adaptation, *WIREs Clim Change*, 5:23–35, doi: 10.1002/wcc.261, 2014.
- [53] Benedetti-Doumic, A. et Martin T., Note technique sur la géo-ingénierie de l'environnement, Principe du parasol solaire, Analyse préliminaire du concept proposé par Roger Angel, CNES, DCT/DA/PA - 2014.0010795, 2014.
- [54] de Guillebon, B., Boucher, O., Abbadie, L., Barré, P., Bekki, S., Bensaude-Vincent, B., Blain, S., Bonnelle, D., Ciais, P., Clin, F., Dahan, A., Dangeard, M.-L., de Richter, R., Dörries, M., Dumergues, L., Fisset, B., Gasser, T., Gemenne, F., Godin-Beekmann, S., Guillaume,

- B., Ha-Duong, M., Laperrelle, J.-M., Maugis, P., Montout, D., Perret, P., Quéguiner, B., Salas y Melia, D., Trolard, F., van Hemert, M., Vésine, E., et Vidalenc, E., ANR [Agence nationale de la recherche] - Atelier de réflexion prospective REAGIR : Réflexion systémique sur les enjeux et méthodes de la géo-ingénierie de l'environnement, document de synthèse, 2014.
- [55] The Royal Society, *Geoengineering the climate: Science, governance and uncertainty*, 2009.
https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2009/8693.pdf
- [56] Robock, A., Marquardt, A., Kravitz, B., and Stenchikov, G., Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering, *Geophys. Res. Lett.*, 36, doi:10.1029/2009GL039209, 2009.
- [57] Boucher, O., de Guillebon, B., Abbadie, L., Barré, P., Bekki, S., Bensaude-Vincent, B., Blain, S., Bonnelle, D., Ciais, P., Clin, F., Dahan, A., Dangeard, M.-L., de Richter, R., Dörries, M., Dumergues, L., Fisset, B., Gasser, T., Gemenne, F., Godin, S., Guillaume, B., Ha-Duong, M., Laperrelle, J.-M., Maugis, P., Montout, D., Perret, P., Quéguiner, B., Salas y Melia, D., Trolard, F., van Hemert, M., Vésine, E., et Vidalenc, E., ANR [Agence Nationale de la Recherche] - Atelier de Réflexion Prospective REAGIR : Réflexion systémique sur les enjeux et méthodes de la géo-ingénierie de l'environnement, Rapport final, avril 2014.
- [58] Crutzen, P.J., Albedo enhancement by stratospheric sulfur injections: A contribution to resolve a policy dilemma?, *Clim Change* 77:211–220, 2006.
- [59] Schäfer, S., Lawrence, M., Stelzer, H., Born, W., Low, S., Aaheim, A., Adriáola, P., Betz, G., Boucher, O., Cariu, A., Devine-Right, P., Gullberg, A. T., Haszeldine, S., Haywood, J., Houghton, K., Ibarrola, R., Irvine, P., Kristjansson, J.-E., Lenton, T., Link, J. S. A., Maas, A., Meyer, L., Muri, H., Oschlies, A., Proelß, A., Rayner, T., Rickels, W., Ruthner, L., Scheffran, J., Schmidt, H., Schulz, M., Scott, V., Shackley, S., Tänzler, D., Watson, M., Vaughan, N. [2015] The European Transdisciplinary Assessment of Climate Engineering (EuTRACE). Removing Greenhouse Gases from the Atmosphere and Reflecting Sunlight away from Earth. Funded by the European Union's Seventh Framework Programme under Grant Agreement 306993.
- [60] CGDD [Commissariat général au développement durable], Observatoire national des emplois et métiers de l'économie verte, Le marché de l'emploi de l'économie verte, Études et documents n° 110, 2014.
- [61] CESE [Conseil économique social et environnemental], Rapport « L'emploi dans la transition écologique », 2015.
- [62] IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, doi:10.1017/CB09781107415324.
- [63] IPCC, 2014: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [64] Global Carbon Project : <http://www.globalcarbonproject.org/carbonbudget/>
- [65] Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Part-et-evolution-des-secteurs.html>
- [66] Le Quéré, C., Moriarty, R., Andrew, R. M., Peters, G. P., Ciais, P., Friedlingstein, P., Jones, S. D., Sitch, S., Tans, P., Arneeth, A., Boden, T. A., Bopp, L., Bozec, Y., Canadell, J. G., Chini, L. P., Chevallier, F., Cosca, C. E., Harris, I., Hoppema, M., Houghton, R. A., House, J. I., Jain, A. K., Johannessen, T., Kato, E., Keeling, R. F., Kitidis, V., Klein Goldewijk, K., Koven, C., Landa, C. S., Landschützer, P., Lenton, A., Lima, I. D., Marland, G., Mathis, J. T., Metzl, N., Nojiri, Y., Olsen, A., Ono, T., Peng, S., Peters, W., Pfeil, B., Poulter, B., Raupach, M. R., Regnier, P., Rödenbeck, C., Saito, S., Salisbury, J. E., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Segschneider, J., Steinhoff, T., Stocker, B. D., Sutton, A. J., Takahashi, T., Tilbrook, B., van der Werf, G. R., Viovy, N., Wang, Y.-P., Wanninkhof, R., Wiltshire, A., and Zeng, N., Global carbon budget 2014, *Earth Syst. Sci. Data*, 7:47-85, doi:10.5194/essd-7-47-2015, 2015.
- [67] IEA [International Energy Agency], CO2 Emissions from Fuel Combustion 2013, IEA, Paris, doi:10.1787/co2_fuel-2013-en.
- [68] Ellerman D., Convery F. et de Perthuis C., *Le prix du carbone. Les enseignements du marché européen du CO₂*, Pearson, 2010.
- [69] Schubert K., *Pour la taxe carbone, la politique économique face à la menace climatique*, Éditions Rue d'Ulm, 2009.
- [70] Tirole J., « Économie politique du changement climatique », in *Le climat va-t-il changer le capitalisme ?* sous la direction de Mistral J., Éditions Eyrolles, 2015.

Références

- [71] Charpin J.-M. et Contamin R., « Les entreprises prennent-elles en compte le prix du carbone dans leurs décisions ? », in *Le climat va-t-il changer le capitalisme ?* sous la direction de Mistral J., Éditions Eyrolles, 2015.
- [72] Giraud P.-N., « Ressources naturelles et croissance verte : au-delà des illusions », in *Le climat va-t-il changer le capitalisme ?* sous la direction de Mistral J., Éditions Eyrolles, 2015.
- [73] European commission, Analyse d'impact, Document accompagnant le train de mesures pour la réalisation des objectifs fixés par l'Union européenne pour 2020 en matière de changement climatique et d'énergies renouvelables, janvier 2008.
- [74] Euro-CASE (European Council of Academies of Applied Sciences, Technologies and Engineering), Policy position paper "Reform options for the European emissions trading system (EU ETS)", 2014.
http://www.acatech.de/fileadmin/user_upload/Baumstruktur_nach_Website/Acatech/root/de/Aktuelles_Presse/Presseinfos_News/ab_2014/Euro-CASE_policy_paper_ETE_reform.pdf