

# Réflexions d'un jeune ingénieur sur le colloque *Changer avec le Climat* tenu à Bercy le 30 juin 2015

Par Pierre JÉRÉMIE  
Ingénieur des mines

En cette année 2015, qui verra la France accueillir en décembre la 21<sup>ème</sup> Conférence des parties (COP21), il m'a été donné d'assister, le 30 juin dernier, au colloque « Changer avec le climat » organisé conjointement par l'Association française de prévention des catastrophes naturelles (AFPCN) et le Conseil général de l'Économie (CGE). Les grands enjeux du changement climatique y ont été débattus sur la base de perspectives dressées en matière économique, technique et sociétale. Le présent compte-rendu des travaux du colloque (agrémenté de quelques digressions) décrit notamment trois exemples de filières économiques susceptibles de contribuer à une bonne gestion du cycle de carbone, au travers d'actions allant de projets prométhéens et transnationaux à des solutions plus champêtres et de dimension locale. Face aux incertitudes qui s'attachent tant à l'ampleur des bouleversements climatiques qu'au montant des investissements à réaliser, une chose paraît certaine : les meilleures solutions sont celles qui permettent à la fois une bonne adaptation au changement climatique et une réduction sensible des émissions de gaz à effet de serre.

## Introduction

La COP21, que la France accueillera du 30 novembre au 11 décembre 2015, est un événement majeur de par sa taille et son enjeu : l'objectif d'un accord international, voire universel, sur le climat - un accord qui soit aussi engageant, voire contraignant que possible afin de maintenir l'élévation de température globale en dessous des 2°C. C'est un objectif très ambitieux qui exige, selon le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), que les émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES) cumulées d'ici à 2100 soient maintenues en deçà de 1 000 gigatonnes (Gt). Le rythme d'émission actuel de 35 Gt/an laisse présager que les 1 000 Gt d'émissions cumulées de GES seront atteintes dès 2040. Il y a donc un enjeu majeur au succès diplomatique de cette conférence, qui doit rendre possibles les efforts importants qui sont nécessaires pour maintenir le réchauffement planétaire à un niveau tolérable. Les principaux émetteurs de gaz à effet de serre devront en particulier s'engager sur les termes d'un accord universel entrant en vigueur à l'horizon 2020 - dont l'accord bilatéral États-Unis-Chine de 2014 pourrait constituer le point de départ.

L'accord qui sera signé à Villepinte ne pourra pas être l'unique instrument du combat contre les émissions de

GES. Ce sera l'objet de l'agenda des solutions que de cibler des leviers économiques et techniques permettant d'orienter les investissements vers une meilleure prise en compte de l'exigence de la lutte contre le réchauffement climatique ; cela passera par des orientations fiscales et subventionnelles, par des progrès technologiques et une action volontariste en matière de préservation des « puits de carbone » (des forêts, notamment).

Au cours du colloque du 30 juin 2015 auquel j'ai pu assister, le choix a été fait d'aborder en premier lieu la question de la lutte contre le réchauffement climatique sous l'angle de l'analyse économique <sup>(1)</sup>. Des efforts importants ont été consentis en France et en Europe : la France, plus particulièrement, du fait des choix de politique énergétique qu'elle a faits depuis 1970, a su, en comparaison à d'autres pays, aller bien plus loin dans la décarbonation de son économie. Un des enjeux clés de la COP21 sera de parvenir à faire partager la dynamique européenne de réduction des émissions par un large ensemble de pays

(1) « Remarques économiques et historiques sur les enjeux de la négociation climatique à venir », VALÉRIAN (F.), *Annales des Mines, Responsabilité & Environnement*, n°80, octobre 2015

émetteurs, et notamment par les grandes puissances émergentes, compte tenu de l'importance et de la croissance rapide de leurs émissions. Le défi économique de l'atténuation du réchauffement climatique et de l'adaptation au changement climatique, qui exigent des investissements considérables, pourra être transformé en une opportunité de développement de nouvelles activités économiques et de création d'emplois dans de nouvelles filières, à la condition toutefois que les politiques publiques parviennent à faire concorder les incitations économiques avec la préservation des équilibres écologiques.

À ce défi économique s'ajoute un défi technologique <sup>(2)</sup>. Les différentes solutions émergentes présentées en matière de gestion de l'énergie se déploient dans le temps long. Le secteur énergétique présente une inertie importante corrélée non seulement à l'ampleur des investissements à réaliser, mais aussi à la lenteur du rythme de développement des nouvelles technologies et de leur adoption. La croissance importante des énergies renouvelables pose la question des investissements substantiels indispensables pour mettre à niveau les réseaux et pouvoir maintenir l'équilibre de systèmes électriques comportant une part croissante de sources intermittentes. Les technologies de stockage massif de l'électricité n'en sont encore qu'au stade de la recherche et développement et, pour l'essentiel, elles n'ont pas encore franchi le cap de l'industrialisation mis à part le cas, limité par nature, du stockage par pompage/turbinage d'eau. Enfin, l'émergence de technologies de captage et de stockage des gaz à effet de serre est subordonnée à la question d'une valorisation économique de ces gaz, si l'on veut que ces technologies deviennent rentables. Les perspectives d'évolution technologique du secteur énergétique sont à mettre en parallèle avec celles du secteur des transports, qui est responsable de plus de la moitié de la consommation mondiale de pétrole. L'évolution de ce secteur s'est inscrite jusqu'à présent dans le temps long, et sa décarbonation passera probablement par un panachage entre différentes solutions pertinentes pour chacun des divers modes de transport.

Enfin, le troisième défi posé par les évolutions climatiques est d'ordre sociétal <sup>(3)</sup> : si des mesures suffisantes, requérant une transition de nos modes de consommation et de nos outils de production vers des solutions moins émettrices, ne sont pas prises rapidement, les changements climatiques qui surviendront seront d'une ampleur telle qu'ils risquent de susciter des flux migratoires sans précédent. Une action, sinon globale, tout du moins transnationale - qu'elle soit fiscale, infrastructurelle et administrative ou monétaire -, sera nécessaire pour prévenir une catastrophe tant humanitaire qu'écologique à l'échelle planétaire.

Au-delà de cette vision économique et d'une mise en perspective technologique et prospective de la question de l'adaptation et de l'atténuation du changement climatique, ce colloque a également cherché à dégager les problématiques spécifiques de trois champs d'action concrets susceptibles d'être fortement touchés par les évolutions climatiques, tout en étant en première ligne

pour proposer des solutions participant à la maîtrise des émissions de GES et à l'atténuation des effets du réchauffement climatique : a) la gestion des sols (notamment des espaces exploités par l'agriculture et l'élevage, en interaction avec les enjeux de sécurité alimentaire et de capture de carbone dans les sols), b) l'industrie du bois et la gestion des espaces forestiers et, enfin, c) l'émergence de filières de séparation, séquestration et valorisation du dioxyde de carbone. Ce sont là trois domaines dans lesquels des solutions concrètes devraient voir le jour.

## Éléments de contexte et enjeux

### Rappels sur les enjeux économiques et les politiques publiques du changement climatique

Avant toute chose, il convient de rappeler que des doutes importants subsistent au sujet de la rentabilité économique des efforts de lutte contre le réchauffement climatique - au-delà de l'évidence de l'impératif moral qu'il y a à préserver l'environnement - et que l'évaluation économique du coût de la lutte contre le réchauffement climatique et ses effets tombe sous le coup d'une double incertitude portant non seulement sur le coût marginal de ces efforts, mais également sur l'amplitude du réchauffement qui se produira *in fine* quand sera atteint un certain niveau d'émissions. Cette double incertitude ne manque pas de rendre la tâche d'estimation et d'analyse économique particulièrement ardue. Nous présenterons ici cette double incertitude et les difficultés qui en résultent pour définir une politique publique, à partir d'éléments de l'exposé de François Valérian.

Il y a en pratique une interpénétration entre des sujets économiques, historiques et scientifiques : nous verrons que cela ne manque pas de nous inviter à faire une lecture historico-économique du réchauffement climatique. Nous décrirons ici quelques mécanismes de lutte contre le changement climatique, puis la mécanique des conférences climatiques.

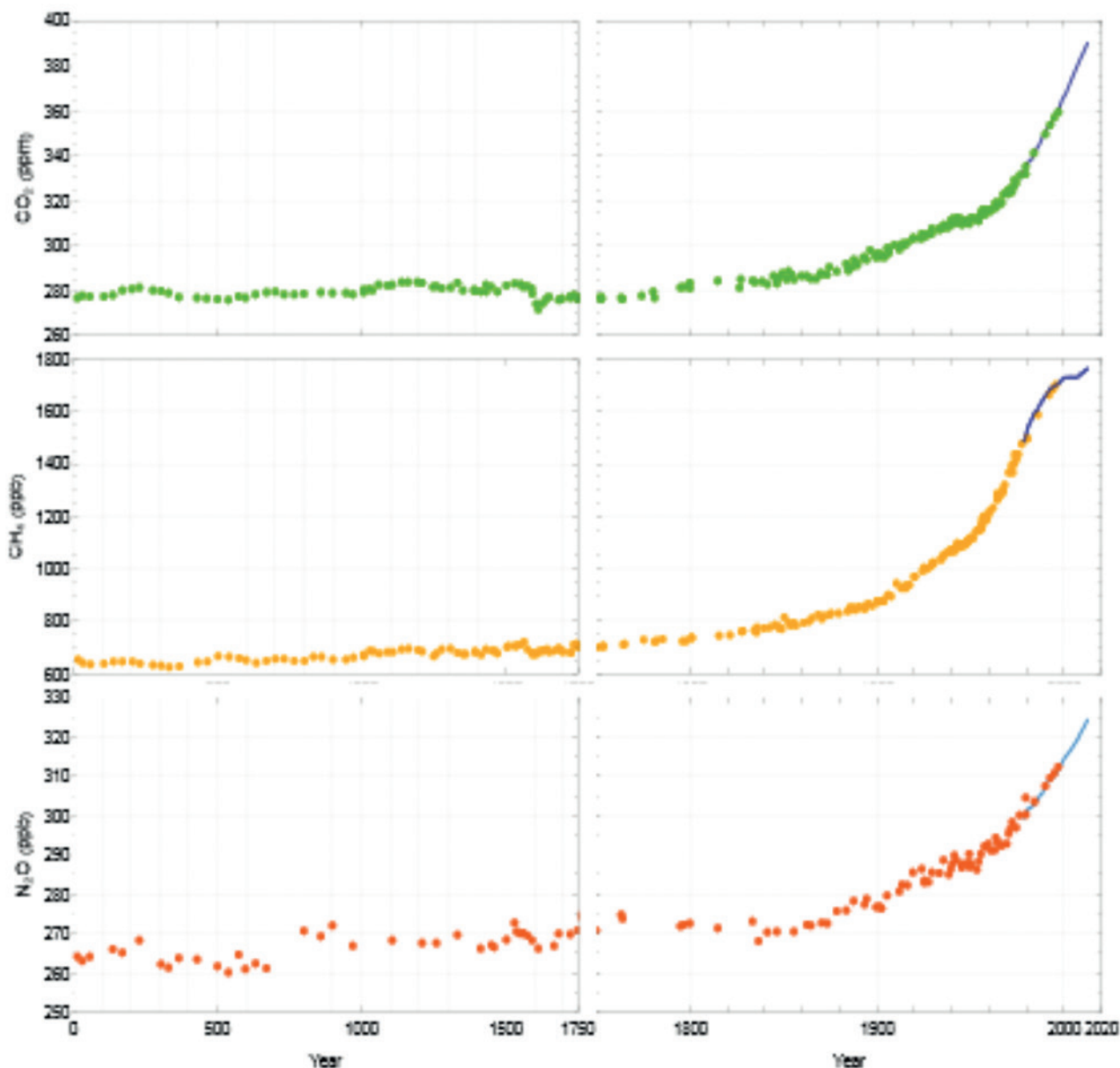
Comme l'a proposé François Valérian dans son exposé, nous retiendrons comme hypothèse de départ ce que l'on appelle le *consensus climatique* : il ne s'agit ni d'une loi ni d'une vérité climatique, mais plutôt d'une nécessité pratique pour mener à bien cette réflexion. Trois faits saillants issus du dernier rapport du GIEC <sup>(4)</sup> et figurant en *introit* de l'exposé peuvent ici être mis en exergue :

- « Chacune des trois dernières décennies a été plus chaude que toutes les décennies précédentes depuis 1850 » ;

(2) « Analyse prospective des solutions technologiques au défi climatique », APPERT (O.), Annales des Mines, Responsabilité & Environnement, n°80, octobre 2015.

(3) Réchauffement climatique, sécheresses et migrations, GAUDIN (T.), *ibidem*.

(4) IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report, Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.



Graphique 1 : Concentrations atmosphériques des principaux gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane, protoxyde d'azote) d'après carottages <sup>(5)</sup>.

- « Il est extrêmement probable que plus de la moitié de l'augmentation observée dans la température moyenne globale de surface de 1951 à 2010 a été causée par l'augmentation anthropogène des concentrations en gaz à effet de serre, en même temps que d'autres pressions, anthropiques ou non » ;
- « des changements dans de nombreux événements climatiques extrêmes, probablement corrélés au changement climatique général, ne peuvent être niés ».

Pour reprendre les éléments de diagnostic présentés lors du colloque, la concentration atmosphérique en dioxyde de carbone atteignait, en 2011, 391 parties par million (ppm), soit 112 ppm de plus qu'en 1750. Sur ces 112 ppm, 72 ont été constatées depuis 1960. Dans les scénarios sans effort d'atténuation particulier, cette concentration atteindrait de 750 à 950 ppm d'ici à 2100. Dans de tels scénarios, selon les simulations du GIEC, la température devrait augmenter de plus de 2°C par rapport à

la moyenne de la période 1750-1900. On estime que cela peut être évité en stabilisant cette concentration à 450 ppm en 2100, et que la hausse de la température moyenne pourrait alors être jugulée à 2°C. Ce chiffre des 2°C est apparu pour la première fois dans un ouvrage de R. Dubost et B. Ward en vue de la conférence de Stockholm de 1972 (il fut alors présenté comme un scénario ne devant pas être dépassé). En 1995, il fut à nouveau évoqué, mais cette fois comme un scénario médian, et non plus comme un scénario à ne pas dépasser. Il constitue aujourd'hui un objectif simple et largement partagé par les participants aux négociations.

(5) D'après l'exposé « Actions de réduction et projections des concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> », CIAIS (Philippe), LSCE Gif-sur-Yvette.

Si ces éléments de diagnostic, qui sont présentés de manière plus détaillée dans l'article de François Valérian <sup>(6)</sup>, publié dans ce même numéro de *Responsabilité et Environnement*, commencent à faire consensus, les solutions pour atteindre cette cible des 2°C restent d'une construction plus délicate. Si, comme nous l'avons dit, une analyse économique quantitative se trouve rapidement confrontée à la quasi-impossibilité d'estimer avec une marge de certitude satisfaisante les données d'entrée du problème, les outils conceptuels de l'analyse économique peuvent toutefois être mobilisés pour comprendre la difficulté à faire émerger des solutions partagées de maîtrise des émissions. Il y a un vrai problème de *stratégie du passager clandestin* : chacun est susceptible de faire peu d'efforts en comptant sur les autres, avec le risque d'une inaction généralisée : on est donc dans le *dilemme du prisonnier*, dont on ne peut sortir que par une action collective volontaire.

À l'échelle nationale ou à l'échelle internationale, plusieurs outils <sup>(7)</sup> peuvent être envisagés pour fournir des incitations à la décarbonation des activités humaines. J'en citerai trois, les plus fréquemment évoqués (outre l'aide à la recherche et à l'innovation) :

- a) L'outil réglementaire : imposer des normes sévères à certaines activités émettrices de carbone, voire les interdire. Cette solution est susceptible d'être appliquée à certaines activités économiques pour lesquelles des solutions de substitution existent ou peuvent être développées ; on doit viser en priorité des pratiques à l'effet particulièrement délétère (par exemple, les cultures sur brûlis pratiquées dans certaines zones) ;
- b) Une famille d'outils cherchant à construire un système de prix du carbone en taxant le carbone émis, en diminuant les subventions aux énergies fossiles et en subventionnant des énergies alternatives ;
- c) La mise en place d'un marché fondé sur le volume de carbone émis, à travers la création d'un système de quotas.

Comme cela a été expliqué lors du colloque, il y a actuellement un débat animé chez les économistes sur les mérites respectifs de ces deux derniers types d'outils - un débat que l'on peut faire remonter à l'article publié en 1974 de Martin L. Weitzman, *Prices versus Quantities*. Pour en livrer un résumé et une analyse personnelle succincte, cet article de Weitzman, tel que le décrit Pizer dans une note d'octobre 1997 intitulée *Prices versus Quantities Revisited, the case of Climate Change*, part du constat que, sur un marché régulé en situation d'information parfaite sur le coût des efforts de réduction des émissions, des contrôles sur les prix ou sur les volumes produits sont strictement équivalents en termes d'efficacité économique. L'opposition entre les deux méthodes trouve son origine dans le fait suivant : selon que l'on fait l'hypothèse que le *revenu* des producteurs de carbone décroît de plus en plus vite à mesure que l'on fait des efforts de réduction, ou que l'on fait celle que le *coût des réductions* décroît à mesure que l'on fait des efforts de réduction, le choix n'est pas le même. La question du caractère croissant ou dé-

croissant du coût marginal d'une réduction des émissions est en effet critique : les taxes figent le coût marginal des réductions au niveau déterminé de la taxe. De ce fait, elles sont moins intéressantes dans des situations où les coûts marginaux des réductions d'émissions sont croissants.

À l'inverse, un système de permis d'émission limite les volumes de GES produits, mais il donne lieu à toute une gamme de coûts potentiels. Or, en pratique, il me semble clair que l'ampleur des incertitudes statistiques, la diversité des champs techniques émettant des GES et celle des conditions économiques rencontrées par les acteurs économiques concernés par le problème rendent particulièrement complexe la résolution de cette question. Au-delà de cet argumentaire de stricte optimalité technique, il s'agit également, me semble-t-il, d'un choix de politique économique entre, d'une part, des solutions *market-based* comme le sont les quotas, mais supposant une gouvernance complexe de l'allocation de quotas et une certification dont les coûts de transfert et de réalisation sont délicats à apprécier et, d'autre part, des solutions (notamment fiscales ou subventionnelles) supposant une implication plus forte des États dans le fonctionnement de l'économie, plus aisées à moduler sur différents territoires et traditionnellement plus keynésiennes que libérales.

Une politique de quotas soulève, comme le fait remarquer François Valérian, la difficulté technique de l'année de référence. Kyoto retient 1990, la dernière année où fonctionnait, en régime plus ou moins nominal, l'appareil industriel soviétique, ce qui rendait commode sa mise en œuvre, au moins pour les pays de l'ex-bloc de l'Est. Les marchés de quotas ont par ailleurs une efficacité discutable : ils permettent certes de fixer un prix à l'émission carbonée, mais ils supposent nécessairement l'existence d'un acteur public qui, en dernier ressort, rachèterait toujours les émissions carbonées. Cela reviendrait, au fond, à créer une nouvelle monnaie basée sur l'engagement des banques centrales, ce qui mérite d'être considéré avec une certaine circonspection, tant au regard du coût qu'au regard de l'inefficacité de marchés par essence peu liquides.

Au-delà de ces incertitudes pesant sur les politiques les plus opportunes à mettre en œuvre et sur les méthodologies de leur implémentation, il y a une grande difficulté à simplement évaluer les investissements nécessaires : à titre d'exemple, si le rapport du groupe de travail n°3 du GIEC de 2014 fait état d'investissements s'élevant en 2009 à 450 milliards de dollars par an, pour atteindre 750 milliards de dollars par an sur la période allant jusqu'en 2029, ces chiffres doivent être entendus comme des ordres de grandeur en raison de leur ampleur et de l'éloignement des horizons temporels retenus.

En tout état de cause, les nombreuses incertitudes pesant sur toute analyse économique de ce problème plaident (comme l'observait François Valérian en conclusion de la

(6) Remarques économiques et historiques sur les enjeux de la négociation climatique à venir, VALÉRIAN (F.), *op. cit.*

(7) Faisant l'objet d'une analyse plus détaillée dans [6].

première partie de son exposé) en faveur d'une approche pragmatique du sujet cherchant à identifier certains secteurs ou certaines filières clés, vers lesquels des investissements pourraient être orientés, qui auraient un impact favorable sur les émissions de gaz à effet de serre, tout en apportant également d'autres bénéfices économiques.

### D'une politique publique du climat à l'émergence d'instances de dialogue œuvrant pour une politique globale de lutte contre le réchauffement climatique

La première notion de politique publique du climat que j'ai pu trouver au cours de mes recherches remonte aux *Recherches et considérations sur la population de la France* de Moheau (1778)<sup>(8)</sup>. Celui-ci affirmait notamment : « *Il dépend du gouvernement de changer la température de l'air et d'améliorer le climat ; un cours donné aux eaux crouissantes, des forêts plantées ou brûlées, des montagnes détruites par le temps ou par la culture continuelle de leur superficie forment un sol et un climat nouveau. Tel est l'effet du temps, de l'habitation de la Terre, et des vicissitudes dans l'ordre physique, que les cantons les plus sains sont devenus morbifiques* ».

C'est toutefois aux États-Unis, dans les années 1950 et 1960, qu'est née en pratique la notion moderne de modification du climat, avec notamment des recherches sur des techniques permettant de modifier le climat chez l'adversaire dans le contexte de la Guerre froide. Nous examinerons dans la présente section les politiques publiques en matière climatique des quatre principaux pays émetteurs, qui représentaient, en 2013, 58 % des émissions globales (28 % pour la Chine, 14 % pour les États-Unis, 10 % pour l'Union européenne et 7 % pour l'Inde), en reprenant le fil de la seconde partie de l'exposé de François Valérian, dédiée aux politiques publiques du climat.

Dès 1960-1970, l'idée apparaît clairement au sein de l'administration américaine de ne pas conduire ces réflexions sur un chemin susceptible de nuire à la croissance économique. Henry Kissinger, notamment, avait adressé dans les années 1970 une note à l'UNED (*United Nations Environment and Development*) lui recommandant de s'en tenir à la *dépollution*. En 1997 un amendement bipartisan voté à l'unanimité au Sénat américain demandait à l'administration de ne pas signer d'accord climatique susceptible d'avoir un impact majeur sur l'économie américaine. Certains États (comme la Californie ou ceux du Nord-est) mettront certes en place leurs propres politiques, souvent voisines des différents schémas mis en œuvre en Europe à partir du début des années 1990, mais, au niveau fédéral, toute politique publique de réduction des émissions paraît aujourd'hui conditionnée par une évolution politique majeure.

En Europe, les « Paquets Énergie-Climat » successifs ont été mis en place en intégrant les particularismes de certains États membres (une économie française très peu carbonée du fait du choix historique de développer un parc électronucléaire important, le choix par l'Allemagne de son « tournant énergétique », une Pologne à la tradition charbonnière...), donnant ainsi lieu à un équilibre géopolitique complexe des négociations communautaires

européennes en matière d'énergie et de politique du climat, comme peut l'illustrer l'actuelle divergence entre les choix énergétiques allemands et français, pourtant présentés sous des termes aussi voisins qu'*Energiewende* et *Transition énergétique*. Les États membres ont intégré ces objectifs dans leurs politiques nationales, notamment la France, qui fait figurer l'objectif d'une division par quatre de ses émissions d'ici à 2050 dans la loi de transition énergétique pour une croissance verte, promulguée le 18 août 2015. Un tel objectif ne manque pas d'avoir des implications importantes en termes de choix de vie, voire de choix de société : je rappellerai ici que les émissions françaises ont été, selon les chiffres de l'AIE, de 5,8 tonnes de CO<sub>2</sub> équivalent par habitant en 2007, à mettre en rapport avec les 2,2 tonnes émises pour un aller-retour Paris-New York en classe économique, et qu'en 2014 (selon les chiffres du *Bulletin statistique de la DGAC*) 112,9 millions de passagers ont utilisé un vol France-international.

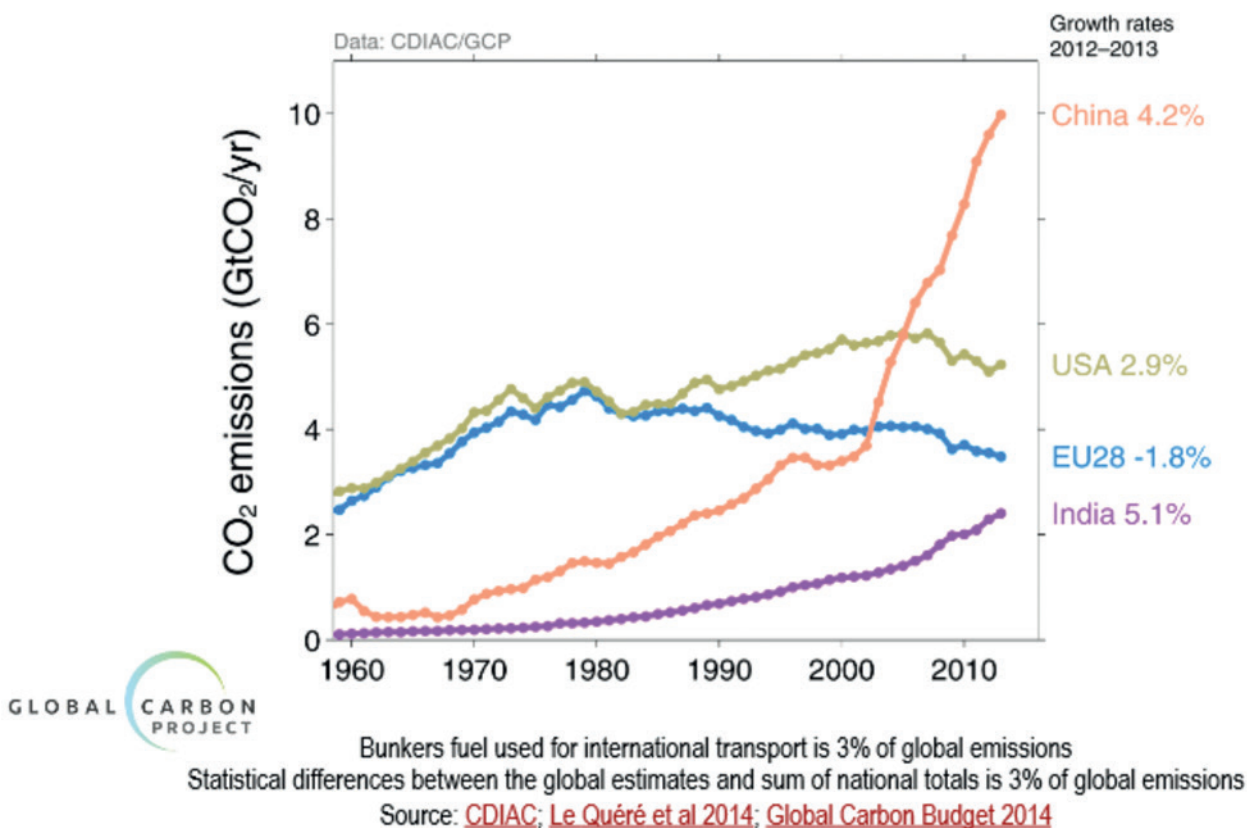
Le sujet est encore plus complexe dans les pays en développement, qui sont regroupés dans diverses instances associant parfois la Chine : citons notamment le G77, l'EOSIS qui regroupe les petits États insulaires, le groupe des États les moins industrialisés, etc.

Des oppositions au sein du groupe des pays du Sud ont notamment transparu à Durban lors d'une intervention du représentant de Grenade, qui mettait en perspective le développement rapide de l'économie et des émissions carbonées des pays émergents et l'impact sur de petites économies insulaires du réchauffement climatique et de la montée des océans.

Quant aux grands pays émergents, leur position n'est plus un refus systématique de toute concession en matière de réduction de leurs émissions de GES, dès lors que la priorité est accordée au développement économique et à la lutte contre la pauvreté. Un témoignage de cette évolution est l'accord conclu en 2014 entre les États-Unis et la Chine, par lequel celle-ci s'engage à réduire ses émissions à partir 2030, sans écarter une augmentation encore substantielle de ses émissions d'ici là. Ce revirement n'est pas sans lien avec la sensibilisation des populations aux impacts sanitaires des émissions industrielles, même si le dioxyde de carbone ne présente pas de risques en exposition chronique à faibles doses. Le mix énergétique brésilien, quant à lui, comprend beaucoup d'hydroélectricité et de biocarburants, mais l'ampleur de la déforestation conduit finalement à un bilan carbone relativement défavorable, bien que perfectible sous réserve d'amplifier la lutte contre le déboisement et contre la culture sur brûlis. Pour leur part, l'Inde et l'Afrique du Sud sont des puissances charbonnières historiques.

Le Graphique 2 de la page suivante résume l'ensemble des éléments évoqués plus haut : l'évolution sur le temps long des émissions des États-Unis, suivant le rythme de leur croissance économique moyenne et correspondant à

(8) Et donc précédant la première parution des *Annales des Mines* de quelques années.



Graphique 2 : Évolution des émissions de dioxyde de carbone pour les quatre principaux émetteurs <sup>(9)</sup>.

une absence de politique fédérale de réduction des émissions, des efforts visibles de la part des États membres de l'Union européenne donnant lieu à des baisses substantielles des émissions à partir de 1980, liées pour partie aux politiques volontaristes mises en œuvre (incluant un système d'allocation de quotas d'émissions), ainsi qu'aux délocalisations de certaines activités fortement émettrices dans des pays à bas coûts de main-d'œuvre. Ces évolutions dans les économies développées viennent en regard de l'explosion des émissions des économies émergentes, notamment chinoise et indienne, liée à leur croissance économique très rapide ainsi qu'à la part du charbon dans leurs parcs de production d'électricité.

À partir des années 1970, suite aux progrès de la connaissance sur le climat et sur l'évolution de la composition de l'atmosphère, notamment au travers des travaux du GIEC, les négociations internationales sur le climat se sont organisées selon une gouvernance spécifique mise en place depuis le Sommet de la Terre de Rio-de-Janeiro (1992), qui alterne de simples conférences des parties (CoP, *Conference of Parties*) signataires de la convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, dans lesquelles les parties s'entendent sur un programme de négociation et, parfois, sur des rendez-vous pour valider des décisions éventuellement contraignantes.

Le dernier accord contraignant remonte à la 3<sup>ème</sup> Conférence des parties qui s'est tenue à Kyoto en 1997. Celui-ci, plus connu sous le nom de Protocole de Kyoto, est entré en vigueur le 16 février 2005 « au quatre-vingt-

dixième jour après la date à laquelle au moins 55 Parties à la Convention incluant les Parties Annexe I qui comptaient en 1990 un total d'au moins 55 % des émissions de CO<sub>2</sub> de ce groupe avaient déposé leurs instruments de ratification, d'acceptation, d'approbation ou d'accession ».

Aujourd'hui quasi universellement ratifié (sauf par les États-Unis et le Canada), il fixe comme objectif une réduction entre 2008 et 2012 d'au moins 5 % des émissions de six gaz à effet de serre (le dioxyde de carbone, le méthane, le protoxyde d'azote et trois substituts des chlorofluorocarbones) par rapport au niveau atteint en 1990. Il avait été prévu en 1997 de poursuivre en 2005 des négociations pour la période après 2012, mais celles-ci n'ont pas pu avoir lieu au niveau mondial ; seules certaines parties ont choisi de manière volontaire de poursuivre l'effort de réduction de leurs émissions de GES au-delà de la période visée par le protocole.

Un autre enjeu de la prolongation des efforts du protocole de Kyoto a été d'associer les pays en voie de développement <sup>(10)</sup> à des engagements quantifiés de réduction de leurs émissions de GES, qui n'étaient pas visés précédemment. L'évolution de la répartition mondiale des émissions (visible dans les courbes du Graphique ci-dessus)

(9) D'après l'exposé « Actions de réduction et projections des concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> », CIAIS (Philippe), LSCE Gif-sur-Yvette.

(10) Il est à ce propos intéressant de noter qu'en 1997, la Corée du Sud n'avait pas été visée par le protocole.

explique le choix fait en 1997, ainsi que l'importance qu'il y a à associer l'ensemble des émetteurs (pays émergents ou non) dans un accord global visant une réduction des émissions ou tout du moins une maîtrise de l'intensité carbone des différents pays.

La plateforme de négociation retenue à Durban a fixé comme objectif à la Conférence des parties de Paris en 2015 d'aboutir à « un protocole, un autre instrument juridique ou un texte convenu d'un commun accord ayant valeur juridique ». Il me semble clair qu'un échec ne manquerait pas de mettre tous les pays devant leurs responsabilités - en particulier les grands émergents, à l'heure où ceux-ci aspirent à une stature diplomatique mondiale.

### Éléments prospectifs sur les solutions technologiques

Si les progrès technologiques sont naturellement une des voies essentielles pour la résolution du défi climatique, force est d'admettre que les progrès majeurs, en particulier en matière de maîtrise de l'énergie, se déploient dans le temps long. Nous reprendrons ici succinctement l'état des lieux de la consommation d'énergie primaire qu'Olivier Appert a proposé dans son exposé.

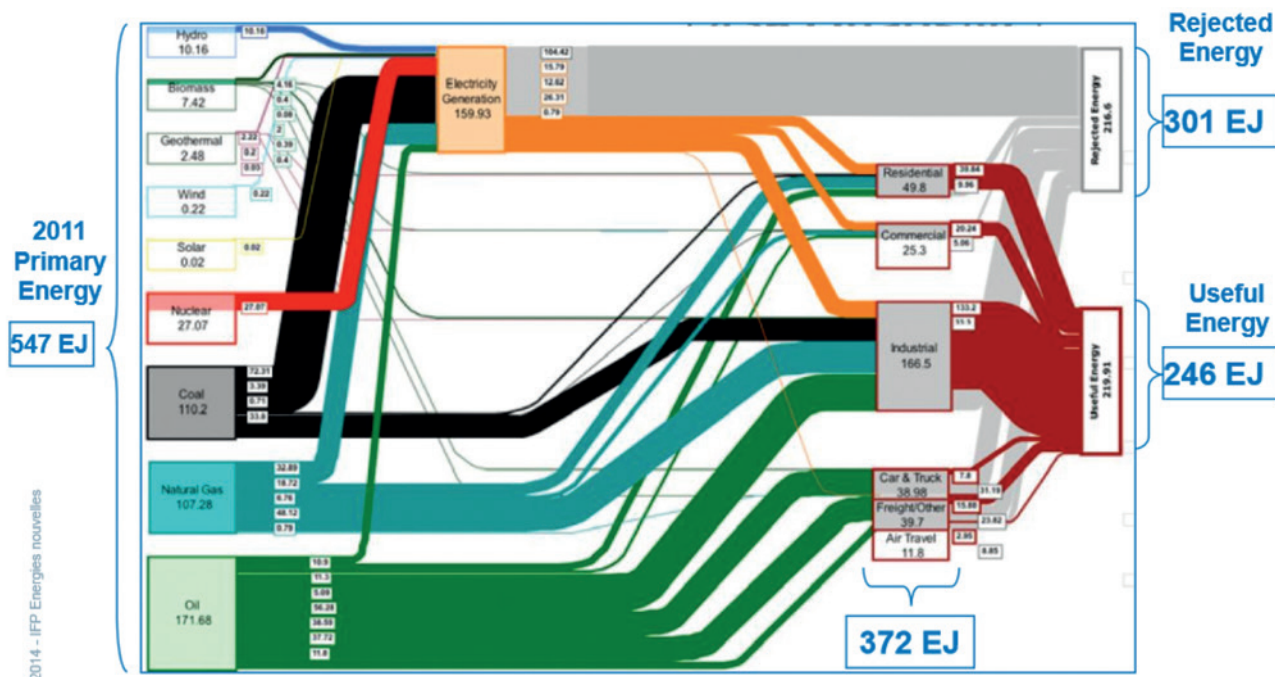
À titre d'introduction, le diagramme de flux (voir le Graphique 3 ci-dessous), présenté par Olivier Appert en ouverture de son exposé, illustre de manière très visuelle la répartition des sources d'énergie et de la consommation finale. Au total, 547 exajoules (EJ) (1 EJ = 10<sup>18</sup> joules ou 1 milliard de milliards de joules) ont été produits en 2011 : 301 EJ ont été rejetés directement dans l'environnement<sup>(1)</sup>, et 246 EJ ont été utilisés. On observe de manière particulièrement évidente la part importante des énergies fossiles dans le mix énergétique mondial, ainsi que leur caractère très difficilement substituable, ou en tout cas leur part ultra-majoritaire dans certaines utilisations finales

clés (industrie et transports, notamment).

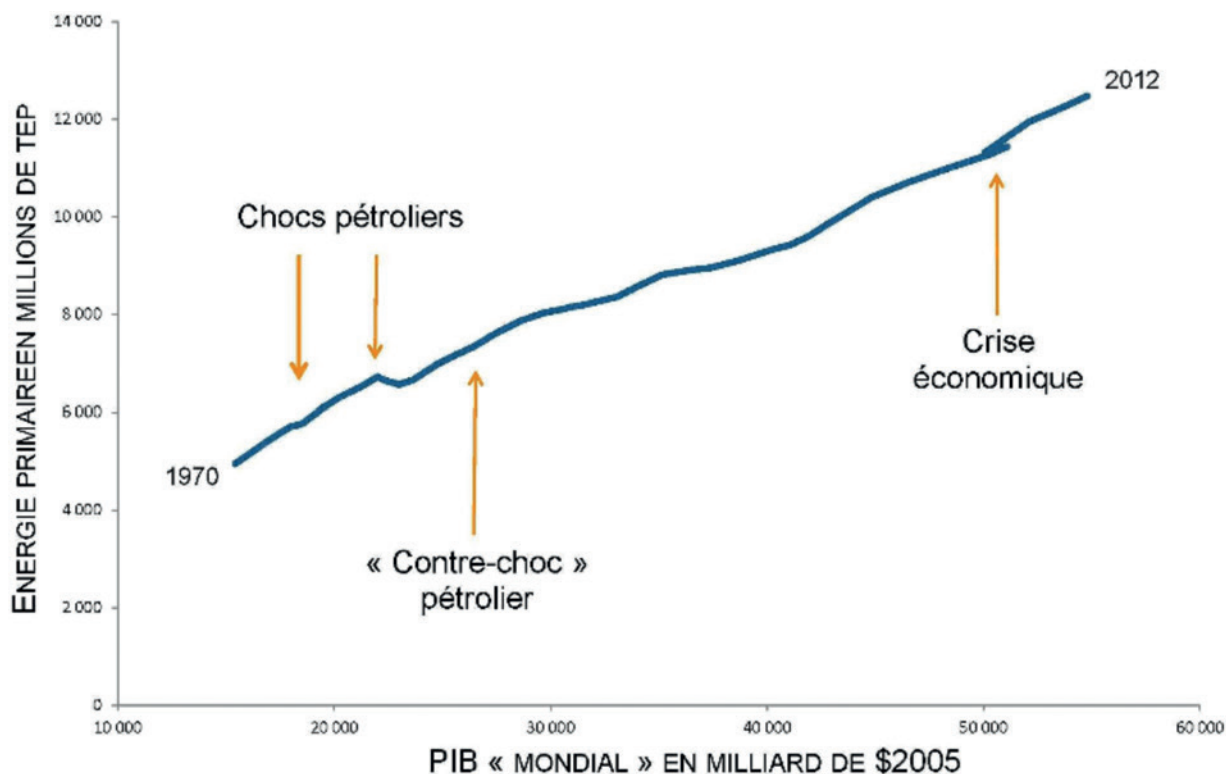
Comme permet de l'observer le Graphique 4 de la page suivante, la consommation d'énergie primaire est en outre très corrélée au PIB mondial. La seule période où le PIB mondial et l'énergie primaire n'ont pas été positivement corrélés se situe dans les années ayant suivi le second choc pétrolier, cette dé-corrélation trouvant notamment son origine dans les efforts menés à cette époque pour réduire le gaspillage énergétique et développer certaines filières de production d'énergie. Mais depuis le contre-choc pétrolier des années 1980, le coefficient de corrélation entre PIB mondial et consommation d'énergie primaire a très peu évolué. Ce constat ne peut qu'amener à être prudents sur l'ampleur des résultats qui peuvent être attendus des efforts en matière d'efficacité énergétique. En raison notamment de l'effet rebond, ceux-ci ne peuvent constituer une solution à eux seuls, sauf à changer radicalement de paradigme en consentant à une décroissance économique qui ne fait pas consensus politiquement ou socialement.

On peut également noter que de 1965 à 2010, le mix de la production d'énergie primaire mondiale est resté largement dominé par les énergies fossiles : les évolutions principales ont eu lieu entre 1970 et 1990, surtout en faveur du nucléaire, mais depuis 1990 il n'y a pas eu de tendance significative à une décarbonation du système énergétique mondial. Une analyse complète du mix énergétique primaire mondial doit aller au-delà du seul secteur de la production électrique, qui est en pratique un des secteurs les plus décarbonés, pour s'intéresser notamment aux consommations énergétiques de l'industrie et des transports, qui sont, elles, peu décarbonées.

(1) Rendement de Carnot dans les machines dithermes.



Graphique 3 : Diagramme de flux de la production et de la consommation d'énergie primaire mondiale – 2011.



Graphique 4 : Relation entre PIB Mondial et consommation d'énergie primaire (en MTEP).

Les projections actuelles du scénario « nouvelles politiques » de l'AIE WEO 2014 envisagent une poursuite de la croissance de la demande d'énergie primaire corrélée à la croissance économique, et celle-ci devrait atteindre 18 000 EJ en 2040. La part du charbon pourrait continuer à croître, mais dans ce scénario, il est prévu par les experts que les énergies décarbonées passent de 19 à 25 % du mix entre 1990 et 2040. L'ampleur des efforts à mettre en œuvre apparaît ici clairement, à mon sens, et l'on comprend donc aisément que c'est un large éventail de technologies qui sera nécessaire pour réduire significativement les émissions, en jouant certes sur les économies d'énergie, mais également sur la mise en valeur des sources les moins spécifiquement émettrices de GES.

Si, reprenant le fil de l'exposé d'Olivier Appert, nous nous penchons sur les pistes technologiques envisageables, le SET Plan de l'Union européenne examine diverses pistes technologiques en plusieurs vagues successives : certaines se trouvent du côté de la demande (efficacité énergétique dans le bâtiment et dans les transports), d'autres du côté de l'offre (capture et stockage de carbone en seconde vague), et d'autres encore du côté du secteur des transports (voiture à hydrogène). Il m'apparaît intéressant de noter que ce plan datant de 2008 laissait de côté la perspective du développement de solutions de stockage à grande échelle de l'électricité : de telles technologies permettraient tant de contribuer à la décarbonation du secteur des transports que de participer au fonctionnement harmonieux de réseaux électriques accueillant une part croissante d'énergies renouvelables à la production intermittente. Il y a là aujourd'hui un goulet d'étranglement technologique majeur.

Le développement des productions renouvelables d'électricité a été particulièrement impressionnant au cours de la dernière décennie, mais il a été alimenté par des politiques publiques de subventionnement volontaristes, comme l'a rappelé Olivier Appert. En 2012, par exemple, ce sont 17 milliards de dollars de subventions<sup>(12)</sup> qui ont été versés en Allemagne pour appuyer le déploiement du solaire photovoltaïque, de l'éolien et de la biomasse, avec un effet global limité sur les émissions en raison du recours corrélatif au charbon : si, de 2010 à 2013, la part du nucléaire dans la production d'électricité est passée de 22 à 15 % et la part des renouvelables de 16 à 23 %, la part du lignite est, pour la première fois depuis 2005, repassée au-dessus des 25 %. Le recours à des énergies fossiles ou à la biomasse en accompagnement du déploiement des énergies renouvelables est nécessaire pour assurer le maintien de l'équilibre offre/demande sur le réseau électrique en temps réel, compte tenu de l'intermittence de la plupart des sources renouvelables, en particulier de l'éolien. Il faut être capable de garantir l'injection d'un certain niveau de puissance électrique sur le réseau si le vent ne souffle pas : des centrales thermiques capables d'être rapidement mobilisées (turbines à gaz, voire groupes diesel en cas d'extrême pointe) doivent être mises en place, dans l'attente de nouvelles technologies de stockage permettant une réinjection rapide d'électricité dans le réseau. Sauf à développer massivement la production de biogaz, ces équipements entraînent mécaniquement des émissions

(12) « Allemagne : une transition énergétique bien peu écologique », Les Echos, Rémy Prudhomme, 21 août 2013.



significatives de gaz à effet de serre. Dans un contexte de compétition internationale exacerbée et d'austérité budgétaire (ou en tout cas d'endettement important) des grandes économies industrialisées, le volontarisme de ces politiques publiques de développement des énergies renouvelables pourrait se voir remis en cause.

Plusieurs pistes technologiques peuvent être envisagées pour le secteur clé du stockage d'énergie sous des formes facilement réinjectables dans le réseau électrique, selon la forme d'énergie stockée et la durée dans laquelle l'énergie stockée doit être mobilisée, ainsi qu'en fonction de l'objectif visé : apporter durablement de l'énergie au réseau ou, au contraire, répondre à de brefs appels de puissance. On peut citer, par capacité et temps de décharge croissant, les super-capacitances, le stockage par volant d'inertie, les batteries, l'hydrogène, le CAES, la chaleur et les centrales de pompage/turbinage. Certaines de ces technologies sont tout à fait matures et déjà mises en œuvre (comme le pompage/turbinage) alors que d'autres sont encore expérimentales (stockage à grande échelle d'énergie sous forme d'hydrogène).

Enfin, les progrès technologiques seront d'une importance cruciale pour la participation du secteur des trans-

ports à la décarbonation du mix énergétique primaire mondial : en attendant l'arrivée à grande échelle de véhicules électriques d'un prix abordable et d'une autonomie comparable à celle des véhicules à combustibles fossiles, ou bien de véhicules dotés de piles à combustible à hydrogène, beaucoup de progrès peuvent être faits sur les technologies existantes : hybridation et petite électrification (*start and stop*) ou amélioration des moteurs thermiques. Allant de 20 % (dans le cas de moteurs à essence traditionnels) à 50 % (dans le cas de moteurs hybrides), des gains d'efficacité énergétique peuvent également être mobilisés en jouant tant sur des éléments non moteurs (aérodynamique, résistance au roulement notamment dans les pneumatiques, réduction du poids des véhicules, gestion énergétique à l'intérieur du véhicule) que sur les éléments moteurs.

En conclusion rapide de ce chapitre, je soulignerai qu'au regard des éléments présentés lors du colloque, la forte corrélation observée entre demande d'énergie primaire et population et PIB ne semble pas près de s'inverser. L'ensemble des technologies susceptibles de contribuer à la décarbonation du mix énergétique mondial (efficacité énergétique, captage et stockage du CO<sub>2</sub> (CCS), nucléaire de génération 3+ puis 4, énergies renouvelables



Photo © Paul Langrock/ZENIT-LAIF-REA

Centrale pilote E.on "power to gas". L'hydrogène produit par électrolyse est traité ensuite comme du gaz naturel pour produire chaleur et électricité, Falkenhagen (Allemagne), août 2014.

« Plusieurs pistes technologiques peuvent être envisagées pour le secteur clé du stockage d'énergie sous des formes facilement réinjectables dans le réseau électrique. On peut citer, par capacité et temps de décharge croissant, les super-capacitances, le stockage par volant d'inertie, les batteries, l'hydrogène, le CAES, la chaleur et les centrales de pompage/turbinage. »

combinées à des technologies de stockage, etc.) devra être mobilisé pour permettre, conjointement à un effort particulièrement vif d'efficacité énergétique, de répondre à l'impératif de réduction des émissions de GES. L'émergence à grande échelle de différentes pistes technologiques prendra encore un certain temps, pendant lequel les sources fossiles resteront incontournables. Je ne peux m'empêcher d'avoir à l'esprit le fait qu'en matière de technologies de maîtrise de l'énergie ou de mobilité, celles-ci sont bien souvent adoptées dans un temps long : le fait qu'une part importante des transports ait encore été à traction animale au cours des 40 années qui ont suivi le lancement de la Ford T, y compris en Europe occidentale, ne manque pas de nous inviter à une certaine prudence quant au déploiement rapide de nouvelles technologies...

### Trois exemples concrets de filières susceptibles de mener des actions de gestion du cycle du carbone

Suite à l'exposé contextuel ci-dessus, je me pencherai, à partir des trois tables rondes de la deuxième partie du colloque, sur trois exemples concrets de filières où des investissements ciblés dans des évolutions des pratiques de production ou dans des équipements spécifiques permettent d'agir sur les cycles du carbone et de l'azote pour maîtriser les concentrations atmosphériques des gaz à effet de serre, et donc les modifications futures du climat, que ce soit en réduisant à la source les émissions ou en jouant sur les volumes de carbone et d'azote stockés dans les phases non-atmosphériques des cycles de ces gaz.

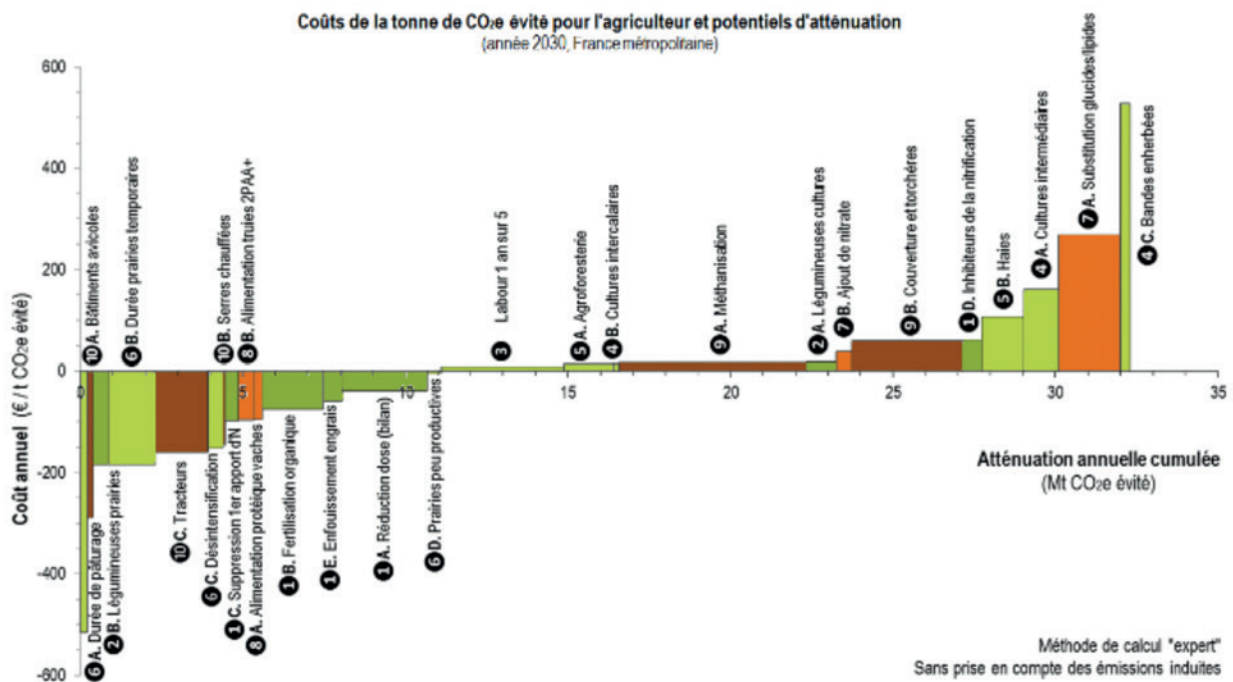
#### Sols, agriculture, élevage et sécurité alimentaire

L'agriculture, l'exploitation forestière et l'élevage (encore appelés le « secteur des terres »), thèmes de la première table ronde pilotée par Guillaume Benoit (Conseil général

de l'Alimentation, de l'Agriculture et des Espaces ruraux - CGAAER), sont susceptibles d'être émetteurs de gaz à effet de serre. Par rapport à d'autres activités anthropiques, ces activités ont la particularité de générer, outre des émissions de dioxyde de carbone, d'autres gaz, dans des volumes comparativement importants, dont l'effet de serre est comparativement encore plus important (méthane généré notamment par l'élevage de ruminants et la culture du riz, protoxyde d'azote généré par l'emploi d'engrais azotés, etc.). En première analyse, ces activités offrent d'importantes marges de progression dans la réduction de leurs émissions de GES, qui peuvent être réalisées sans avoir recours à des sauts technologiques, mais plutôt grâce à une évolution des pratiques et des techniques agricoles et pastorales, et par une gestion différente des sols jouant plus finement sur les cycles du carbone et de l'azote, comme l'illustre l'exposé de J.-F. Soussana. Ces actions présentent en outre l'avantage de se conjuguer bien souvent avec des économies (d'engrais azotés synthétiques et de carburants notamment), ou avec des gains de productivité qui en couvrent largement les coûts. À titre d'exemple, je citerai les estimations faites dans le rapport *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre* réalisé par l'INRA pour l'ADEME, le MAAF et le MEDDE en juillet 2013, qui identifie des réductions potentielles d'émissions pour dix grandes actions à réaliser dans l'agriculture française d'ici à 2030.

On note qu'environ 11 millions de tonnes (Mt) d'équivalent CO<sub>2</sub> peuvent être évitées annuellement pour un coût négatif ou nul, auxquelles s'ajoutent environ 13 Mt à des

(13) *Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ?*, rapport réalisé par l'INRA pour l'ADEME, le MAAF et le MEDDE en juillet 2013.



Graphique 5 : Courbe montrant le coût croissant des atténuations annuelles cumulées identifiées pour dix actions clés <sup>(13)</sup>.

coûts inférieurs à 50€/t de CO<sub>2</sub> évité, et ce en travaillant sur la gestion des sols et des pâturages (gestion améliorée des prairies, labours moins fréquents, plantation de légumineuses permettant de fixer de l'azote dans les sols, etc.), sur l'alimentation animale et sur les pratiques (économies d'énergie sur les équipements agricoles, optimisation de l'utilisation des engrais, etc.)

En outre, les sols, notamment agricoles, assurent une fonction très importante de rétention du carbone, avec des concentrations de l'ordre de trois fois supérieures à celles présentes dans l'atmosphère<sup>(14)</sup>, et des techniques déjà maîtrisées permettent de jouer sur ce paramètre. Les 830 Gt de carbone présentes dans l'atmosphère peuvent être comparées aux 820 Gt de carbone stockées dans les 40 premiers centimètres de sol à la surface de notre planète : une augmentation annuelle de 4 pour 1 000 des stocks de matière organique dans les sols permettrait de compenser annuellement 3,5 Gt sur les 8,9 Gt de carbone fossile émis chaque année, et de ramener les émissions de GES à un niveau acceptable. C'est dans cet esprit qu'a été mis en place un programme de recherche agronomique international, le « 4 pour 1 000 », annoncé par M. Stéphane Le Foll, ministre de l'Agriculture, le 17 mars 2015 dernier.

Les principales pistes de recherche pour parvenir à cet objectif sont le développement d'une agriculture dite de conservation : celle-ci viserait à minimiser le travail du sol, à en maintenir une couverture permanente et à diversifier autant que possible les espèces cultivées dans l'espace et dans le temps. Un bon exemple de pratiques d'agriculture de conservation est la mise en œuvre des techniques de SBLRPP (*Sown Biodiverse Legume Rich Permanent Pastures*) expérimentées au Portugal, en Italie et en Espagne dans des zones de climat méditerranéen particulièrement exposées au changement climatique (écosystèmes de type *montado* ou *dehesa*). Cette technique, qui a été présentée dans l'exposé de David Crespo, consiste, pour les pâturages, à mettre en culture sur le même terrain des mélanges de légumineuses et d'herbes très biodiverses, en sélectionnant préférentiellement des essences locales ayant des pouvoirs méthanogènes réduits et permettant d'améliorer substantiellement la productivité des pâturages, leur persistance, la séquestration de carbone (environ 4,5 à 18 tonnes de dioxyde de carbone atmosphérique stocké) et la fixation d'azote en jouant sur des symbioses entre légumineuses ensemencées et des rhizobiums. Cette diversification des pâturages permet également une amélioration de la productivité et de la qualité des productions animales élevées sur ces terrains, et de réduire les importations d'aliments pour animaux, souvent coûteuses en carbone.

À cet effort d'évolution des pratiques peut venir s'ajouter le déploiement de nouvelles technologies, comme celles développées par le réseau *Climate Smart Agriculture Booster*, lancé en janvier 2015 avec l'appui du programme européen *Climate KIC*, que Jean-François Soussana a évoqué dans son exposé. Ces technologies, qui peuvent être globalement regroupées sous la désignation de *smart agriculture*, visent à mettre à profit les technologies de

l'information pour la collecte et l'exploitation à grande échelle de données sur les espaces agricoles et les cultures en vue de développer notamment des dispositifs de cartographie et de suivi très précis des concentrations d'intrants à délivrer ou des modes d'irrigation, permettant d'importantes économies d'émissions de GES.

L'agriculture et l'élevage présentent donc, au vu des exposés du colloque, des spécificités qui les mettent au cœur des transitions à accomplir pour atténuer et accompagner le changement climatique : les techniques et les évolutions de pratiques à mettre en œuvre ont la particularité d'y permettre souvent des gains de productivité et de réduire les émissions des activités agricoles, tout en les rendant plus capables de maintenir un niveau élevé de rendement, et ce malgré le changement climatique (épisodes climatiques extrêmes plus fréquents, moyennes de températures plus élevées, etc.). Une véritable prise de conscience du rôle fondamental que peuvent jouer les stockages de carbone par les sols et des bénéfices qui peuvent résulter d'un suivi des concentrations en carbone organique dans les sols pour la profession agricole jouera un rôle essentiel dans le développement de ces nouvelles techniques.

### La forêt et l'industrie du bois

Un autre champ d'action important pour l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (principalement du dioxyde de carbone) et pour améliorer la capture et le stockage du carbone atmosphérique est l'adaptation du secteur de l'exploitation forestière évoquée dans la seconde table ronde de l'après-midi. Comme l'a rappelé Jean-Luc Peyron en introduction à la table ronde, la forêt exerce sur le climat des influences multiples : en modifiant la réflexion de la lumière solaire (effet d'albédo), en modifiant l'hygrométrie (évapotranspiration des végétaux), en stockant du carbone *via* la photosynthèse, et également *via* l'émission de composés organiques volatils, notamment non méthaniques, ainsi que par l'émission de méthane (dégradation en milieu peu oxygéné de matières végétales). L'ensemble de la filière forêt-bois apporte donc des contributions multiples au bilan carbone : *via* des effets de substitution (occupation des sols, production d'énergie, etc.) et *via* des effets de stockage de carbone (utilisation du bois comme matériau de construction, stockage de carbone en forêt dans les sols, le bois mort, le sous-bois, les feuilles et la matière ligneuse).

Il convient ici de revenir sur les éléments de diagnostic de la forêt française qu'a présentés Antoine Colin et de rappeler que le secteur forestier en France représente, avec 16 millions d'hectares de forêt en métropole, la troisième surface forestière en Europe, et qu'il fournit dans l'ensemble de la filière forêt-bois près de 450 000 emplois : la forêt française produit chaque année 100 millions de mètres cubes (Mm<sup>3</sup>) de biomasse bois, dont seulement 60 % sont récoltés, et séquestre chaque année 80 millions de tonnes nettes de CO<sub>2</sub>, soit l'équivalent annuel de

(14) UNEP, FAO, JRC 2010.

réduction des émissions de la France au titre du Protocole de Kyoto (dans la première période d'engagement 2008/2012).

La forêt française est donc actuellement un très important puits de carbone. Il s'agit de forêts jeunes et en expansion : depuis 1908, la superficie boisée française s'est accrue de 6 millions d'hectares et, dans l'ensemble, la part des gros et très gros bois a elle aussi progressé peu à peu, passant de 20 à 25 % entre 1980 et 2015 <sup>(15)</sup>, dans un contexte de réduction des petits bois et des taillis.

Dans l'ensemble, et en dépit des tempêtes catastrophiques de 1999 et de 2009, le stock forestier sur pied s'est donc accru d'environ 810 millions de mètres cubes <sup>(16)</sup>. Toutefois il convient de noter que les régions où les stocks se constituent (Massif Central, pourtour méditerranéen, Bretagne) ne sont souvent pas les régions où les prélè-



Photo © Benoit Decout/REA

Stock de copeaux de bois à la chaufferie biomasse de Saint-Étienne-du-Rouvray (Normandie), mai 2010.

« Des progrès importants sont donc réalisables en mettant davantage à profit la filière bois : en combinant les substitutions matériau et énergie, en recherchant des pratiques sylvicoles réduisant la dette carbone en visant à maintenir le stock de carbone forestier à court terme et en améliorant le bilan de long terme (stockage *in fine* de carbone dans les sols), il paraît possible d'avoir un impact important sur les émissions de gaz à effet de serre de notre pays. »

vements sont les plus importants (Landes, Vosges). Il faut donc bien s'attacher à analyser la dynamique du massif forestier français et ses conséquences en termes de bilan carbone. Une étude, commandée en 2014 à l'IGN et au CITEPA <sup>(17)</sup>, a envisagé deux scénarios : d'une part, le maintien des taux de coupe actuels et, d'autre part, une gestion dynamisée des massifs forestiers, qui viendrait accroître les prélèvements de 35 millions de mètres cubes par an à l'horizon 2030, en les réalisant de manière homogène sur le parc forestier (y compris les 80 % de forêts privées actuellement peu mobilisées, et en supposant l'absence d'aléas climatiques exceptionnels ou d'effets particuliers du réchauffement climatique). Cette étude montre qu'une hausse substantielle des prélèvements (correspondant au second scénario) serait compatible avec une séquestration à court terme de carbone tout en permettant d'adapter les forêts aux futures évolutions du climat et d'atténuer, grâce aux produits de la filière forêt-bois, les émissions carbonées nationales (effets de substitution de combustibles fossiles par la biomasse, notamment). À plus long terme, le maintien du rôle essentiel de puits de carbone joué par les forêts françaises supposera de toute façon une évolution des pratiques de coupe et une approche intégrée forêt-bois, plutôt que de chercher à surcapitaliser en forêt : une augmentation de la production de bois est tout à fait compatible avec cet objectif d'évolution des massifs et d'adaptation au changement climatique.

Au vu des exposés de cette table ronde, des progrès importants sont donc réalisables en mettant davantage à profit la filière bois : en combinant les substitutions matériau et énergie, en recherchant des pratiques sylvicoles réduisant la dette carbone en visant à maintenir le stock de carbone forestier à court terme et en améliorant le bilan de long terme (stockage *in fine* de carbone dans les sols), il paraît possible d'avoir un impact important sur les émissions de gaz à effet de serre de notre pays. Un développement substantiel de la production de bois est même envisageable, en intégrant les conditions économiques relatives à la gestion forestière, aux marchés et à l'industrie du bois. Un tel développement ne manquera pas d'être source de création d'emplois non-délocalisables situés dans des régions rurales du pays. L'adaptation du secteur forestier au changement climatique peut donc présenter un double bénéfice : certes opportune en termes de préservation du climat et de l'environnement, elle est également source de développement industriel et d'emplois.

### Séparation, séquestration et valorisation du CO<sub>2</sub>

Comme l'observait Didier Bonijoly en ouverture de la table ronde consacrée à ces sujets, les technologies de capture et de séquestration des émissions de gaz à effet de serre (le dioxyde de carbone, le plus souvent) et de valorisation des gaz séquestrés (CCS-V) jouent un rôle majeur dans la plupart des scénarios de réduction des émissions (entre 10 et 30 % selon les scénarios).

(15) Étude IGN.

(16) Étude IGN.

(17) [http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/1\\_projections\\_GES2030\\_foret\\_IGN\\_resultats\\_biomasse\\_2014.pdf](http://inventaire-forestier.ign.fr/spip/IMG/pdf/1_projections_GES2030_foret_IGN_resultats_biomasse_2014.pdf)

Ces technologies concernent principalement l'industrie, notamment la production d'électricité. Leur mise en œuvre est susceptible de constituer une véritable rupture en termes d'émissions (en particulier pour les installations de puissance consommant du charbon), à la différence des évolutions progressives réalisables dans le monde agricole ou forestier (voir plus haut), ou encore dans le secteur des transports (une rupture pouvant toutefois résulter du développement de piles à combustible à bas coût utilisant l'hydrogène). Les potentialités tant en termes de développement économique que de réduction des émissions, et les risques tant financiers que technologiques apparaissent pour l'instant importants, faute de l'assurance d'un prix élevé du carbone (un prix situé entre 50 et 100 dollars la tonne serait nécessaire). En outre, il ne faut pas négliger les oppositions déjà exprimées aux stockages, qui ne manqueront de s'amplifier, en raison de la phobie que suscitent tous les déchets.

En matière de CCS, observait Daniel Clément, les fondamentaux techniques apparaissent aujourd'hui relativement matures et, plus qu'à la R&D fondamentale, l'heure est aujourd'hui au développement de démonstrateurs permettant de faire passer cette technologie à l'échelle industrielle. On peut distinguer deux étapes :

- la capture : dans la plupart des solutions technologiques envisagées, celle-ci se ferait en fixant le dioxyde de carbone par lavage des gaz de combustion avec des solutions alcalines ;
- le stockage : il est nécessaire de démontrer la faisabilité technique du stockage géologique à grande échelle (en particulier dans des aquifères salins) et de mener des recherches concernant les capacités de stockage en France.

À l'heure actuelle, plusieurs opérateurs ont déjà mis au point des pilotes de captage en oxycombustion, transport et stockage géologique : ainsi, Total a mis en œuvre une solution de ce type à Lacq ; après la fin des essais d'injection, le groupe est en train d'en surveiller l'exploitation. Sous réserve que l'on dispose d'un stockage géologique certain et aux risques maîtrisés à proximité (notamment un ancien gisement pétrolier où l'on souhaiterait faire de l'injection pour améliorer le taux de récupération du pétrole ou du gaz), cette technologie peut donc être considérée comme disponible. Toutefois, se pose la question de son coût. Dans le cas d'une production électrique, si l'on extrapole les chiffres du pilote de captage Alstom/Dow porté par EDF (évoqué par Valérie Czop dans son exposé) le coût du stockage se situe entre 60 et 80 euros la tonne, soit 10 fois le prix de marché actuel de quotas d'émissions : cela ne permet donc pas la faisabilité du projet. S'il est vrai qu'aux États-Unis, en mer du Nord ou en Algérie, de la réinjection de dioxyde de carbone existe, c'est toujours avec, en contrepartie financière, la récupération secondaire d'hydrocarbures, l'augmentation de la productivité du gisement parvenant à compenser le coût de cette technologie. La condition technique majeure de sa diffusion est aujourd'hui l'amélioration de la connaissance des capacités de stockage géologique à l'échelle européenne et la modélisation du comportement des dif-

férents sites possibles (aquifères salins, roches poreuses, etc.) dans le long terme. Des progrès de la connaissance en matière de risques technologiques et un encadrement réglementaire spécifique pourraient également contribuer à améliorer l'acceptabilité sociale du déploiement de ces solutions et à réduire les inquiétudes suscitées par les risques éventuels de leur mise en œuvre.

Les estimations les plus récentes estiment également que le stockage géologique du dioxyde de carbone capturé pourrait être complété par une valorisation de ce produit, jusqu'à présent traité sinon réglementairement, du moins fonctionnellement, comme un déchet dépourvu de valeur économique. Naturellement, compte tenu des volumes de production de dioxyde de carbone et des applications industrielles limitées de ce gaz, la valorisation ne pourra constituer que quelques pourcents des volumes traités, mais elle ne saurait être négligée, compte tenu de l'enjeu sociétal du développement de l'économie circulaire comme l'a souligné Anne de Béthencourt dans son exposé.

Enfin, une dernière piste, plus prospective, évoquée par François Clin et étudiée activement aux États-Unis en liaison avec des universités japonaises et suisses (et abordée récemment lors de séances publiques de l'Académie française des sciences) pourrait consister, en transposant industriellement la photosynthèse, à capturer le dioxyde de carbone non plus sur son lieu de production, mais directement dans l'atmosphère. Le processus s'apparenterait à des techniques relevant *in fine* de la géo-ingénierie : avec un coût énergétique modéré, on pourrait imaginer, par exemple, de capturer le dioxyde de carbone atmosphérique par réaction avec des lagunes artificielles de lait de chaux<sup>(18)</sup> permettant d'envisager de constituer un puits de carbone artificiel stockant du carbonate de calcium (éventuellement valorisé par la suite en tant que craie). Selon les calculs présentés, des rendements par hectare intéressants (de l'ordre du million de tonnes de dioxyde de carbone par an) peuvent être envisagés pour des coûts énergétiques modérés. Toutefois, au regard des importants échanges avec la salle, force est de constater qu'à l'instar d'autres technologies de géo-ingénierie proches de la science-fiction (ensemencement des océans, modification locale de l'albédo terrestre), la mise en œuvre de telles solutions supposerait une adhésion renouvelée de nos sociétés à un paradigme très prométhéen de la maîtrise du climat, qui, en Europe comme ailleurs, rencontre des objections de toutes natures, en particulier éthiques.

## Conclusion

Comme le constatait en conclusion Pascal Dupuis, le dérèglement climatique n'a jamais été une préoccupation aussi importante qu'aujourd'hui, à l'heure où la France représente 1 % des émissions et l'Europe 10 % (pour 20 % du PIB mondial). Toutes les solutions doivent être trouvées à l'échelle globale. Dans ce contexte, il sera crucial de trouver le bon dosage pour les politiques domestiques

(18) CLIN (F.), ex. BRGM et ministère de la Recherche.

afin que celles-ci profitent à l'activité. Dans ce cadre, l'Europe tente de porter une certaine exemplarité pour convaincre les autres d'agir : c'est l'objectif affiché pour le Paquet énergie-climat pour 2030. Dans cet ensemble réglementaire ont été prises des décisions engageant sur le climat et la croissance des États membres très différents entre eux : la capacité des pays à y participer est évaluée sur la base de leur PIB par habitant. Cette réussite en matière de négociation constitue un bel exemple à suivre pour la COP21.

La mise en place par l'Europe d'un système de *cap and trade* sur les émissions de carbone couvrant environ 5 % des émissions mondiales est également un succès prometteur : si, aujourd'hui, des imperfections dans le fonctionnement du marché donnent lieu à des niveaux de prix ne correspondant pas au coût réel des émissions carbonées, un mécanisme jouant sur les volumes de carbone sur le marché sera mis en place pour restaurer des niveaux de prix acceptables. Ce volontarisme de certains États et le fait que 40 États sur 196 (au jour du colloque) - responsables d'environ 55 % des émissions mondiales - aient formulé une proposition de contribution nationale volontaire à la réduction des émissions globales permettent de nourrir des espoirs quant au succès de la Conférence de Paris.

Le défi de l'adaptation au changement climatique peut faire appel à des solutions qui contribuent également à l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre. De telles solutions devront être développées en privilégiant celles qui participent au développement économique et à l'emploi et donnent une valorisation économique aux réductions d'émissions ou aux émissions capturées et stockées. À ce titre, le dioxyde de carbone a naturelle-

ment vocation à être considéré comme une ressource, et, plus généralement, les réductions d'émissions devraient trouver une valorisation de marché directement ou indirectement en tant que facteur de productivité : les trois exemples de champ d'action décrits ci-dessus en donnent une bonne illustration. Il appartiendra pour ce faire aux États de fixer un prix du carbone qui corresponde à une évaluation réaliste de l'externalité négative du carbone émis et d'imposer ce prix par des mécanismes aussi *market-based* que possible, car c'est là un préalable à toute approche rationnelle du problème et au démarrage d'investissements de grande ampleur : cela supposera une volonté de mettre en place les outils de régulation financière correspondants.

La contribution française aux réductions d'émissions de gaz à effet de serre pourra donc mettre utilement à profit, comme nous l'avons illustré par les exemples des champs d'action détaillés ci-dessus, des solutions plus ou moins sophistiquées reposant sur une évolution culturelle de certaines professions et sur les techniques numériques appliquées aux réseaux et aux échanges, en faisant non seulement évoluer son appareil industriel vers des dispositifs moins carbonés et plus efficaces, parfois dotés de moyens de capture et de stockage de carbone, mais également en assurant la transition du monde agricole et sylvicole vers des pratiques moins intensives et plus soucieuses de préserver et de développer les stocks de carbone et d'azote des sols et des forêts, et ainsi plus productives. La transition énergétique et climatique se situe en réalité là où on ne l'attend pas, et seule une bonne conduite des évolutions de ces filières permettra d'assurer l'adaptation de l'appareil productif au changement climatique vers un modèle créateur d'emplois et source de développement pour nos territoires