



IESF
SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS ET
SCIENTIFIQUES DE FRANCE



Changement climatique

un défi pour les ingénieurs

Changement climatique : un défi pour les ingénieurs

Changement climatique : un défi pour les ingénieurs



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

Couverture : Conception graphique de B. Defretin, Lisieux.

Illustration : fotolia/pict rider.

Composition et mise en pages : Patrick Leleux PAO

Imprimé en France

ISBN (papier) : 978-2-7598-2249-2

ISBN (ebook) : 978-2-7598-2250-8

Cet ouvrage est publié en Open Access sous licence creative commons CC-BY-NC-ND (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/.0/fr/>) permettant l'utilisation non commerciale, la distribution, la reproduction du texte, sur n'importe quel support, à condition de citer la source.

© EDP Sciences, 2018

SOMMAIRE

<i>Préface</i>	7
<i>Avertissement</i>	9
<i>Résumé</i>	11
<i>Introduction</i>	19
Les prévisions du GIEC	21
Les émissions de gaz à effet de serre (GES)	25
La COP21	27
Quelques considérations économiques	31
Les engagements par pays : <i>Intended Nationally Determined Contribution (INDC)</i>	35
Propositions de la Commission de l'Union européenne	39
La France est-elle sur le bon chemin ?	41
Annexes	
Annexe 1 : Émissions dans l'air en France métropolitaine.....	45
Annexe 2 : Propositions de la Commission européenne.....	49
Annexe 3 : Transports.....	67
Annexe 4 : Bâtiment et génie civil.....	73
Annexe 5 : Industrie manufacturière.....	85
Annexe 6 : Production d'énergie.....	87
Annexe 7 : Agriculture, forêt et biomasse.....	95

PRÉFACE

Ce livre représente le croisement de deux volontés.

La première est la volonté, de plus en plus partagée dans le monde, de faire face au réchauffement climatique afin de préserver les conditions de vie des générations à venir. C'est une volonté pour laquelle la France s'est montrée particulièrement active en organisant à Paris la COP21, la conférence des Nations Unies qui a conduit pour la première fois en décembre 2015 un grand nombre de pays à prendre des engagements pour limiter les émissions de gaz à effet de serre dans les prochaines décennies.

La deuxième ambition est celle d'ingénieurs qui souhaitent participer davantage aux débats nationaux sur les grands sujets de société. Davantage tournés vers l'action que vers les discussions, les ingénieurs ne peuvent que constater la place croissante prise par les échanges d'idées de toutes sortes entre des interlocuteurs de plus en plus nombreux, en raison des progrès des techniques de communication et de l'élargissement des champs d'éducation. Ces ingénieurs veulent faire œuvre utile en apportant aux débats publics une contribution fondée sur leurs connaissances scientifiques, leurs expériences professionnelles et leurs méthodes de raisonnement.

C'est à ce titre que les comités sectoriels de la Société des Ingénieurs et Scientifiques de France, qui a vocation à représenter plus d'un

million d'ingénieurs et de deux cent mille chercheurs, ont voulu présenter une analyse des perspectives de réduction des émissions de gaz à effet de serre liées aux principaux secteurs d'activité concernés : les transports, le logement, l'industrie manufacturière, la production d'énergie, l'agriculture et la forêt. Il s'agit de répondre à des questions telles que : comment la France peut-elle tenir, d'ici 2030 à 2050, les engagements très forts qu'elle a pris, en cohérence avec la politique européenne? Quelle contribution peut-on attendre des particuliers, des entreprises, des administrations?

Une information précise du public apparaît d'autant plus nécessaire que la COP23, tenue deux ans après l'accord de Paris, s'est achevée avec le sentiment d'une urgence renouvelée et de la nécessité d'une plus grande ambition dans la lutte contre le réchauffement climatique : la concrétisation de cette ambition passe à l'évidence par une participation plus active de l'ensemble des citoyens du monde, qui commence par une compréhension plus fine des enjeux et des possibilités d'action.

La revue présentée ici a été coordonnée par le président du comité « Environnement » des Ingénieurs et Scientifiques de France, Michel Bruder, avec la participation des comités « Énergie », « Génie civil et bâtiment », « Transports ». Elle est enrichie par une réflexion, menée par trois chercheurs de l'université Paris-Dauphine, sur les propositions de réforme du marché de l'énergie qui ont été publiées par la Commission européenne en novembre 2016. Ce document examine en particulier le rôle des consommateurs d'une part, de la gouvernance des réseaux et des règles de tarification d'autre part, pour tenir les objectifs affichés de développement des énergies renouvelables. Que les auteurs de cet article, Anna Creti, Jacques Percebois et Boris Solier, soient remerciés d'avoir autorisé son insertion dans le présent ouvrage.

Marc Ventre
Président d'IESF

Jacques Bongrand
Président des comités sectoriels

AVERTISSEMENT

Cet ouvrage a été réalisé par le comité Environnement d'IESF présidé par Michel Bruder et composé de Florent Brissaud, Jacques Bongrand, Dominique Chauvin, Jean-François Coste, Antoine Coursimault, Olivier-Paul Dubois-Taine, Jean-Louis Durville, Édouard Freund, Pierre Marcillac, Jacques Peter, Jean-Luc Redaud, Jacques Roudier, Julien Vincent et Bruno Wiltz.

INGÉNIEURS ET SCIENTIFIQUES DE FRANCE (IESF)

La France compte aujourd'hui plus d'un million d'ingénieurs et quelque deux cent mille chercheurs en sciences. Par les associations d'ingénieurs et de diplômés scientifiques qu'il fédère, IESF est l'organe représentatif, reconnu d'utilité publique depuis 1860, de ce corps professionnel qui constitue 4 % de la population active de notre pays. Parmi les missions d'Ingénieurs et Scientifiques de France figurent notamment la promotion d'études scientifiques et techniques, le souci de sa qualité et de son adéquation au marché de l'emploi ainsi que la valorisation des métiers et des activités qui en sont issus. À travers ses comités sectoriels, IESF s'attache ainsi à défendre le progrès, à mettre en relief l'innovation et à proposer des solutions pour l'industrie et pour l'entreprise. Notre profession s'inscrit pleinement dans le paysage économique et prend toute sa part dans le redressement national.

RÉSUMÉ

La COP21 (21^e conférence des parties à la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques), tenue à Paris du 30 novembre au 21 décembre 2015, a été un événement important qui a fait apparaître pour la première fois une reconnaissance mondiale unanime de l'urgence des mesures à prendre pour limiter les émissions de gaz à effet de serre et aussi des mesures à prendre pour s'adapter aux conséquences du changement climatique. La COP22, tenue à Marrakech en novembre 2016, n'a pas apporté d'éléments vraiment nouveaux en dehors de la création d'une « plateforme des stratégies 2050 » (*2050 Pathways* en anglais) qui réunit 22 États, 15 grandes villes et surtout 196 grandes entreprises, qui s'engagent à réduire leurs émissions de carbone. La prise de position des États-Unis après l'élection présidentielle risquait de nuire à la poursuite du consensus mondial sur la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre. Cependant, lors de la COP23 organisée à Berlin en novembre 2017 sous la présidence des îles Fidji, aucun des pays autre que les États-Unis n'a remis en cause les décisions de la COP21. Les représentants des États-Unis sont en fait restés très modérés contrairement à ce que l'on pouvait craindre. À cette date, 170 des 196 parties à l'accord adopté à Paris en décembre 2015 avaient ratifié cet accord.

Une des rares annonces concrètes de la COP a été le lancement de « l’alliance pour la sortie du charbon », à l’initiative du Royaume-Uni et du Canada, dans laquelle la France et un certain nombre d’États américains sont présents, mais pas les principaux utilisateurs de charbon : Chine, Inde et Allemagne.

Il y a consensus de la quasi-totalité des experts pour considérer qu’il y a beaucoup d’aspects positifs dans les conclusions et les engagements de la COP21, mais aussi que les engagements actuels des pays signataires sont encore largement insuffisants pour contenir le réchauffement climatique dans les limites fixées par la COP21. Il faut noter par contre que l’Union européenne a affiché des objectifs ambitieux qui peuvent paraître difficiles à tenir. La France, en cohérence avec l’Europe, a pris des engagements très forts : moins 40 % d’émissions de gaz à effet de serre (GES) en 2030 et moins 75 % en 2050. Ils sont considérablement plus ambitieux que ceux des autres grands pays émetteurs qui prévoient soit de continuer à augmenter fortement leurs émissions d’ici 2030, comme la Chine et l’Inde, ou de ne réaliser que des progrès modestes, comme les États-Unis, le Canada et l’Australie.

Le présent dossier a pour objet d’analyser l’ensemble des mesures mises en œuvre et prévues en particulier en France et dans l’Union européenne, afin d’évaluer leur pertinence et leur efficacité technique, économique et environnementale. Il faut noter que les politiques en matière d’énergie ont été et restent très différentes dans les États membres, ce qui aboutit, entre autres, à des émissions de gaz à effet de serre par habitant également très différentes. La France est un des pays de l’Union européenne qui en émet le moins (19^e rang), principalement à cause du nucléaire et d’une part importante du chauffage des bâtiments à l’électricité : la France émet un peu plus de 5 tonnes d’équivalent CO₂ par habitant contre un peu moins de 9 tonnes pour l’Allemagne (7^e rang) et 7 tonnes pour la moyenne des 28 pays européens.

Dans la plupart des pays, les efforts techniques et les moyens financiers visant à réduire les émissions de GES portent principalement sur la

production d'électricité par des énergies renouvelables, le plus souvent intermittentes, comme le solaire et l'éolien. Cela a déjà commencé à créer quelques problèmes qui risquent de s'aggraver si la proportion de ces énergies intermittentes continue à augmenter sans que l'on ait résolu techniquement et surtout économiquement le problème du stockage de l'électricité. On peut citer le discours de clôture d'Olivier Appert (président du Conseil français de l'énergie) lors du 5^e Forum européen de l'énergie tenu à Paris les 9 et 10 mai 2016 : « J'ai été frappé par le fait que, bien que l'électricité ne représente que 20 % de la consommation globale d'énergie, elle a représenté 95 % de tous les commentaires ». Il est clair qu'il serait préférable de privilégier la réduction des émissions de GES dans toute la chaîne de production et de consommation plutôt qu'en investissant massivement dans les énergies électriques renouvelables intermittentes. On peut donc regretter que la plupart des pays, y compris la France, continuent à privilégier cette dernière approche.

Les problèmes liés au changement climatique ne se conçoivent qu'à long terme. Une vision à long terme est donc indispensable si l'on veut prendre des décisions à court terme qui aillent dans le sens d'un développement véritablement durable. Ceci est particulièrement vrai pour les transports, un des principaux secteurs d'émission de GES : à très long terme, si l'on veut éliminer le recours au pétrole, ne faut-il pas choisir entre l'électricité ou l'hydrogène ou une combinaison des deux ? Et ensuite, tenir compte de ce choix pour prendre les bonnes décisions à court terme. Il serait sans doute préférable de faire porter l'essentiel des recherches dans cette voie plutôt que dans la réduction de consommation des combustibles fossiles.

L'autre secteur grand émetteur de GES est celui des bâtiments, en premier lieu pour le chauffage, soit directement par utilisation de gaz ou de fioul, soit indirectement par le chauffage électrique. Le renouvellement du parc immobilier étant très lent, il apparaît que les réglementations environnementales concernant l'immobilier neuf devraient être complétées par des mesures plus efficaces concernant les bâtiments existants. La prise en compte des EnR intermittentes produites et consommées au

niveau des bâtiments paraît souhaitable. En même temps, des mesures sont à prendre dès à présent pour atténuer les conséquences du changement sur le cadre bâti, la ville et les infrastructures territoriales.

L'agriculture et la forêt sont des secteurs qui sont à l'origine d'émissions de GES, mais qui contribuent aussi à absorber et à stocker du carbone. La déforestation dans les zones tropicales constitue un élément négatif, car elle contribue assez fortement au déstockage du carbone organique. En Europe, au contraire, le volume des forêts a augmenté régulièrement comme conséquence de l'augmentation des rendements agricoles. Il est souhaitable que cette tendance se poursuive. Pour cela, le développement d'une agriculture raisonnée, économe en intrants (les engrais contribuent à la production de GES), mais à productivité élevée, devrait être préféré aux modèles d'agriculture intensive des années récentes. Une amélioration de la gestion des sols agricoles est pour de multiples raisons intéressante, mais n'aura qu'un effet très limité de réduction des GES et ne saurait nous affranchir des stratégies de réduction des GES sur ce secteur.

Les besoins en terres agricoles au niveau mondial augmentent beaucoup plus vite que la population en raison de la forte croissance de la consommation de protéines animales dans les pays émergents. Pour chaque calorie alimentaire produite, la viande nécessite beaucoup plus de surface agricole que les céréales ou les légumineuses, ce qui contribue à la déforestation. De plus, les animaux d'élevage, et en particulier les bovins, sont d'importants émetteurs de GES. Des mesures incitatives visant à réduire la consommation de viande bovine au profit de poisson, de volaille, de porc et de protéines végétales, seraient souhaitables, d'autant plus que cela pourrait avoir une incidence positive sur la santé, comme l'indique une étude publiée par la FAO¹ en mai 2016².

1. Organisation des Nations unies pour l'alimentation et l'agriculture – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.

2. *Plates, pyramids, planet. Developments in national healthy and sustainable guidelines: a state of play assessment*, FCRN (University of Oxford) and FAO (United Nations), May 2016.

Toujours en matière agricole, la production de biocarburant ne semble pas être une solution efficace. Cela a été clairement démontré et acté dans l'Union européenne en 2013 pour les biocarburants de première génération. Mais nous ne pensons pas que la production éventuelle de biocarburants dits de deuxième génération puisse apporter, sauf pour quelques rares exceptions, une solution vraiment plus efficace au problème des transports. Une exploitation efficace de la forêt, comme source de matières premières ou comme source de combustibles destinés à la production de chaleur et éventuellement d'électricité par cogénération, nous semble largement préférable.

Pour ce qui concerne les industries, et en particulier les industries manufacturières, plusieurs éléments sont à prendre en considération. Le premier est la question de la durabilité des biens de consommation : dans les pays développés, on remplace un produit manufacturé en panne par un produit neuf beaucoup plus souvent qu'on ne le répare comme autrefois. Ceci aboutit à un gaspillage d'énergie et de matières premières, d'autant plus que ces produits sont le plus souvent fabriqués loin de leurs lieux de consommation, avec les coûts de transport qui en résultent. Faciliter la maintenance et le dépannage des produits manufacturés devrait faire l'objet de mesures normatives et réglementaires au niveau international. Il serait aussi souhaitable que les biens de consommation, surtout s'ils sont pondéreux comme les produits alimentaires, soient produits le plus près possible de leurs lieux de consommation afin de limiter les émissions de GES liées aux transports, notamment routiers.

Dans le rapport du Conseil général de l'environnement et du développement durable de février 2013³, nous retenons la conclusion suivante, qui nous paraît toujours d'actualité : « Tous secteurs confondus, l'ensemble des exercices prospectifs, si l'on en retient les

3. « Le facteur 4 en France : la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050 », rapport n° 008378-01 du CGEDD, février 2013.

versions raisonnablement optimistes, débouche plutôt sur une réduction des émissions d'un facteur 2 ou 2,5 plutôt que d'un facteur 4». Ceci est vrai au niveau français, mais aussi aux niveaux européen et mondial : les mesures annoncées à ce jour ne devraient pas permettre de limiter le réchauffement à 2 °C (et encore moins à 1,5 °C). S'il s'avère, comme cela paraît de plus en plus probable, que le réchauffement climatique entraîne des conséquences très dommageables dans de nombreux pays, il apparaîtra indispensable de prendre des mesures beaucoup plus sévères et coûteuses, d'autant plus qu'elles auront été prises tardivement.

Il apparaît donc qu'il serait judicieux de mettre en place des incitations plus efficaces pour limiter les émissions de GES. Deux types d'incitations sont envisagées par les économistes : taxation ou réglementation. Une majorité des économistes est plutôt en faveur d'une «taxe carbone». Citons en particulier Jean Tirole, le récent prix Nobel d'économie⁴ : «Pour les économistes, il n'y a que deux solutions : la taxation des émissions, uniforme dans le monde, ou l'instauration de droits d'émissions négociables à l'échelle mondiale... Les mesures administratives (normes, taxations de certains produits...) peuvent être efficaces, mais elles sont souvent très coûteuses en regard du gain en CO₂». Mais un accord au niveau mondial sur une des deux solutions proposées paraît aujourd'hui encore hors de portée.

La mise en œuvre de stratégies d'adaptation, ardemment réclamée par les pays pauvres les plus menacés, est devenue le complément incontournable des programmes de réduction des GES. Parmi les impacts identifiés, les perspectives de modifications des ressources en eau (inondations, sécheresses, typhons) apparaissent comme des préoccupations majeures qui appellent des solutions d'adaptation locales. Les acteurs de l'eau ont développé de nombreuses solutions (systèmes d'alertes, économies d'eau, production d'énergie,

4. Jean Tirole, *Économie du bien commun*, PUF, 2016.

ressources alternatives, etc.) qui offrent des voies d'adaptation. Il est à craindre, malheureusement, que certaines régions de la planète puissent connaître des cas extrêmes de désertification ou d'inondation (relèvement des mers) pouvant conduire à des migrations climatiques.

INTRODUCTION

À l'occasion de la COP21, les médias ont retenu trois chiffres : 2 °C, 1,5 °C et 2,7 °C. Le premier correspond au réchauffement climatique à l'horizon 2100, jugé globalement comme étant un maximum supportable sans trop de dégâts pour l'humanité, le deuxième à un souhait des populations menacées par la hausse du niveau des mers et le troisième à une évaluation du réchauffement correspondant aux engagements de l'ensemble des pays du monde présentés à l'occasion de la COP21. Ces trois chiffres ne traduisent pas vraiment une réalité beaucoup plus complexe et multiforme.

Il faut en effet souligner, comme le fait le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC), que ces chiffres correspondent à des valeurs moyennes prédites par des modèles mathématiques avec un degré d'incertitude qui reste élevé malgré les progrès réalisés depuis la création du GIEC. De plus, ces modèles prévoient, entre autres, des niveaux de réchauffement très différents selon les latitudes, ainsi que des variations importantes de la pluviométrie selon les régions.

Le fait qu'un accord mondial ait pu être réalisé lors de la COP21 traduit, pour la première fois, une prise de conscience également mondiale des problèmes qui peuvent résulter du changement climatique,

et une influence de plus en plus réduite des « climatosceptiques » sur les responsables politiques. Même si cet accord reste imprécis et sans doute largement insuffisant par rapport aux risques prévisibles, il constitue un premier pas important.

Le présent document étudie les points suivants :

- les prévisions du GIEC au niveau mondial et aux niveaux européen et français;
- les émissions de gaz à effet de serre des principaux pays émetteurs;
- les résultats de la COP21 avec les commentaires du groupe de travail;
- les principales conséquences économiques du changement climatique au niveau mondial;
- les engagements des principaux pays émetteurs pour la réduction de leurs émissions;
- les conséquences du changement climatique pour l'Europe et la France ainsi qu'une évaluation des mesures prévues et à prendre par secteur : transports, bâtiment et génie civil, production d'énergie, agriculture, forêt et biomasse, aménagement du territoire.

Les prévisions du GIEC

En matière d'évolution de la température moyenne de surface, les experts du GIEC ne raisonnent pas sur une année déterminée, par exemple 2050 ou 2100, mais sur des plages de 20 ans, pour évaluer des tendances et lisser les aléas climatiques annuels. De plus, le GIEC préfère indiquer des plages probables plutôt que des valeurs moyennes. Par exemple, une hausse moyenne de 1,8 °C entre la période 1986-2005 et la période 2081-2100 correspond à une plage probable de 1,1 à 2,6 °C, c'est-à-dire environ 1,7 à 3,2 °C par rapport à l'ère pré-industrielle (1850-1900). Pour avoir une idée de l'importance du phénomène, il faut noter qu'au cours de la dernière grande glaciation, il y a 22 000 ans, le niveau de la mer était inférieur de 120 mètres au niveau actuel et les grands glaciers couvraient tout le nord de l'Europe et des États-Unis et tout cela à cause d'une température moyenne terrestre de 4 °C inférieure à la température actuelle. Une hausse de plus de 3 °C, et même de plus de 4 °C si l'humanité ne réduit pas suffisamment ses émissions de gaz à effet de serre, devrait avoir des conséquences d'une ampleur considérable sur le climat.

Mais si nous avons de la chance et si l'humanité réagit avec assez d'efficacité, le réchauffement restera limité à environ 2 °C, ce qui est déjà considérable, mais peut être supportable sans dommages excessifs.

Selon une étude récente du célèbre climatologue américain James Hansen, l'augmentation de 0,6 °C de la température terrestre moyenne entre la période 1951-1980 et la période 2005-2015 s'est répartie de manière très différente selon les régions et les saisons. Par exemple, aux États-Unis, le réchauffement moyen entre les deux périodes a été de 0,5 °C en été et de 0,2 °C en hiver, mais dans la zone Méditerranée–Moyen-Orient, les réchauffements respectifs ont été de 1,3 °C en été et de 0,5 °C en hiver. Selon les modèles prédictifs, cette tendance devrait se poursuivre avec un changement climatique particulièrement important dans la zone Méditerranée–Moyen-Orient, ce qui risque, selon Hansen, de rendre pratiquement inhabitable une partie très importante de cette zone.

Dans les zones où la température augmente fortement en été, et en particulier dans la zone Méditerranée–Moyen-Orient, cela devrait se traduire par une augmentation de l'évaporation et une diminution des pluies et entraînerait donc une forte augmentation de l'intensité et de la fréquence des périodes de sécheresse.

Le rapport spécial sur la gestion des risques d'événements extrêmes et de catastrophes en vue d'une meilleure adaptation aux changements climatiques (rapport SREX) établi en 2012 dans le cadre du GIEC étudie la fréquence et l'intensité des événements climatiques extrêmes : sécheresses, cyclones tropicaux, inondations. Il semble qu'il y ait déjà une augmentation significative de ces phénomènes depuis 1950, en particulier en ce qui concerne les périodes de canicule. Selon toute probabilité, l'augmentation devrait se poursuivre et s'amplifier au cours des décennies à venir en fonction de la hausse des températures.

L'élévation du niveau des océans devrait entraîner de graves problèmes dans certaines zones géographiques comme le Bangladesh, les Pays-Bas et les Maldives. Les conséquences de l'acidification des océans sont en cours d'étude et on ignore encore quelles en seront les conséquences sur le phytoplancton et donc sur l'ensemble de la chaîne alimentaire.

Le dernier rapport annuel de l'*American Meteorological Society* publié en août 2017 indique que l'augmentation globale de la température terrestre par rapport à celle de la deuxième moitié du XIX^e siècle a dépassé en 2016 le record observé en 2015, ce qui confirme la reprise de la hausse des températures déjà constatée en 2014, après le ralentissement observé au cours des quelques années précédentes. Parallèlement, le rapport souligne, entre autres, l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des tempêtes tropicales, des sécheresses et canicules, de la poursuite de la fonte des glaciers et de la hausse du niveau des mers. Près de 500 scientifiques de plus de 60 pays ont contribué à ce document.

À la veille de la COP23, une mise en garde à l'humanité a été publiée avec la signature de plus de 15 000 scientifiques de 184 pays à l'adresse des responsables politiques du monde : « Pour éviter une misère généralisée et une perte catastrophique de biodiversité, l'humanité doit adopter une alternative plus durable écologiquement que la pratique qui est la sienne aujourd'hui ».

PRÉVISIONS POUR LA FRANCE ET L'EUROPE

Selon le GIEC, dans l'hypothèse moyenne, la hausse des températures en France à l'horizon 2081-2100 par rapport à la période 1986-2005 serait de l'ordre de 1-1,5 °C pour le tiers Nord-Ouest et de 2-3 °C pour les autres deux tiers en moyenne annuelle. La hausse serait plus faible en hiver, dans la fourchette 1-1,5 °C et plus forte en été dans la fourchette 2-3 °C pour l'ensemble de la France, la tendance à la hausse étant toujours plus forte dans le Sud-Est que dans le Nord-Ouest. Rappelons qu'il faut ajouter à ces chiffres de l'ordre de 0,6-0,8 °C pour se comparer à l'époque préindustrielle.

La pluviométrie annuelle aurait plutôt tendance à augmenter dans le nord et à diminuer dans le sud, mais avec une diminution de l'ordre de 10 % en moyenne pour l'ensemble de la France en été, un peu plus accentuée dans la partie sud. Le nombre et l'intensité des périodes

de canicule devraient augmenter sensiblement, en particulier dans le Sud-Est.

Des études sous l'égide du ministère en charge de l'Environnement, intitulées « Gestion et impacts du changement climatique » (GICC), regroupent des études ponctuelles concernant l'influence du changement climatique dans des domaines précis. Citons par exemple le projet INVULNERABLE qui s'intéresse à la vulnérabilité d'entreprises telles ENGIE et EDF pour les pointes de consommation de gaz et Veolia pour les événements pluvieux extrêmes.

Parmi les principaux impacts potentiels du changement climatique en matière économique, on peut citer la diminution du domaine skiable touchant les stations à relativement basse altitude, les effets sur les rendements agricoles notamment dus aux sécheresses, le déplacement des zones d'attrait touristiques au détriment du quart sud-est du fait de chaleurs excessives en été et une érosion accrue du littoral du fait de la montée du niveau des mers.

Pour le reste de l'Europe, la hausse des températures moyennes annuelles varie de la fourchette 1-1,5 °C de la façade atlantique à 4-5 °C au nord de la Russie. La pluviométrie devrait diminuer sensiblement en Europe méditerranéenne et augmenter en Europe du Nord.

Les émissions de gaz à effet de serre (GES)

Les émissions de CO₂ par habitant varient considérablement selon les pays. Le record appartient au Qatar avec près de 44 tonnes de CO₂ par habitant et par an. L'ensemble des pays du Golfe ont des émissions qui varient autour de 20 tonnes par habitant. Viennent ensuite les États-Unis (17 tonnes). La plupart des pays d'Europe occidentale émettent entre 7 et 9 tonnes. La France, la Suède et la Suisse sont à un peu plus de 5 tonnes grâce à l'énergie hydroélectrique et au nucléaire, c'est-à-dire un peu moins que la Chine (6,6 tonnes). Compte tenu de sa population, la Chine est le principal émetteur de CO₂, suivie par les États-Unis puis l'Union européenne (source CDIAC 2011).

Pour l'année 2013, les émissions de GES en France ont été de 491,1 millions de tonnes d'équivalent CO₂, en diminution de 11 % par rapport à 1990. Les transports représentaient 132,6 Mt soit 27 % des émissions, en hausse de 9,5 % par rapport à 1990, mais en légère baisse par rapport aux années 2000 à 2007. La quasi-totalité de ces émissions (près de 94 %) est due aux transports routiers, dont plus de la moitié aux véhicules particuliers. L'industrie manufacturière représentait 63,7 Mt en 2013 (13 % des émissions) en baisse de 26 % par rapport à 1990, ce qui traduit pour l'essentiel la baisse des activités

industrielles, notamment dans des industries à forte intensité énergétique comme la sidérurgie. Le secteur résidentiel et tertiaire a émis la même année 86,8 Mt (18 % des émissions), à peine moins qu'en 1990. Les émissions de l'agriculture en représentaient 79,5 Mt (16,2 % du total), en baisse de 8 % par rapport à 1990, partagées à peu près à égalité entre l'élevage, en particulier des ruminants, et les engrais. Le reste des émissions provenait des industries de l'énergie (électricité, raffinage, chauffage urbain...) pour 41,1 Mt (soit 8,4 % du total), en baisse de 17 % par rapport à 1990. En sens contraire, l'utilisation des terres, leur changement, et la forêt ont constitué un puits qui a permis l'absorption de 44,3 Mt de GES.

Le rapport de l'*American Meteorological Society* cité plus haut indique que la concentration dans l'atmosphère des gaz à effet de serre a continué à augmenter : pour la première fois, la concentration en CO₂ à l'observatoire de Mauna Loa a dépassé 400 ppm en 2015.

La COP21

La COP21 a constitué incontestablement un progrès par rapport notamment à Kyoto et Copenhague. C'est en effet la première fois que tous les pays sont d'accord pour admettre la réalité et la gravité des perspectives du changement climatique et se sont déclarés prêts à prendre des mesures pour en diminuer l'incidence. Il n'en reste pas moins vrai que les mesures proposées à ce jour par les États sont encore disparates et sans doute largement insuffisantes par rapport à l'objectif d'une hausse moyenne limitée à 2 °C et *a fortiori* à 1,5 °C.

Le tableau ci-après résume les forces et les faiblesses ainsi que les opportunités et les menaces à la suite de l'accord de la COP21.

Force	Faiblesse
<p>Un consensus de 195 pays pour lutter contre le changement climatique par une diminution des émissions de GES</p> <p>Une ratification dans les délais très courts initialement prévus</p> <p>Un engagement des grands États, dont les États-Unis et la Chine</p> <p>Des objectifs ambitieux : limiter le réchauffement à 1,5 °C plutôt que 2 °C</p> <p>Des échéances assez précises avec un calendrier rapproché</p> <p>Un dispositif de révision tous les 5 ans</p> <p>Un dispositif de suivi, sur une base déclarative</p> <p>L'instauration de la transparence et d'un suivi mutuel entre les États</p> <p>Pas de possibilité de mise en cause de la responsabilité passée des États développés</p> <p>Des efforts demandés modulés selon la situation des États, prenant en compte les besoins de croissance des moins développés</p> <p>Un équilibre entre actions pour réduire les émissions de GES et celles pour renforcer les capacités d'adaptation aux effets néfastes des changements climatiques</p> <p>La prise en compte de la mobilisation des acteurs (collectivités locales, industries, associations, citoyens) comme force de propositions et d'initiatives</p>	<p>Pas de mécanisme véritablement contraignant</p> <p>Pas de financiarisation des externalités liées aux émissions de gaz à effet de serre ; pas de taxe carbone ou autre mécanisme de régulation mondiale</p> <p>Trafics aériens et maritimes non pris en compte</p> <p>Contribution des pays développés aux Fonds en faveur des pays en voie de développement non finalisée : laissée au volontariat, avec une dotation plancher indicative</p> <p>Pas de référence explicite aux énergies renouvelables</p>

Opportunités	Menaces
<p>La flexibilité donnée à chaque pays sur les voies et moyens de réduire ses productions de gaz à effet de serre</p> <p>Les opportunités de développements technologiques et économiques</p> <p>La compatibilité affirmée entre croissance et réduction des émissions de GES, y compris par des actions de captures et de stockage, permettant la poursuite de l'usage d'énergies fossiles durant un certain temps</p> <p>La place faite aux initiatives non gouvernementales, propice à la mobilisation collective</p>	<p>Une remise en cause des engagements de certains États, à commencer par les États-Unis, du fait d'alternances gouvernementales</p> <p>L'insuffisance des objectifs nationaux cumulés</p> <p>L'insuffisance des politiques nationales mises en œuvre</p> <p>La non-fiabilité des données de suivi des émissions</p> <p>La priorité donnée à la croissance par rapport à la réduction des émissions de GES, notamment dans les pays en développement</p> <p>L'incapacité mondiale à financer la transition</p>

QUELQUES CONSIDÉRATIONS ÉCONOMIQUES

I. Les effets des émissions de GES sur le climat sont des effets cumulatifs et non linéaires. S'il a fallu près de deux siècles d'accumulation de GES avant que des signes du réchauffement de la planète soient perceptibles, il faudra, à l'inverse, des années d'efforts soutenus de réduction des émissions avant que la courbe du réchauffement se stabilise puis s'inverse : les efforts susceptibles d'être faits n'ont pas d'effets bénéfiques immédiats.

Si certains des effets du changement climatique ont des impacts économiques directs appréciables, par exemple en termes de rendements agricoles ou de disponibilité des ressources en eau, beaucoup d'autres impacts sont des externalités, affectées d'aléas forts, notamment en matière de catastrophes naturelles.

Le premier rapport fait sur le coût économique du changement climatique et l'intérêt économique de lutter contre lui, est celui établi en 2006 par Nicholas Stern, ancien vice-président senior de la Banque mondiale de 2000 à 2003⁵, à la demande du ministère des Finances britannique. Il concluait, sur la base d'une approche coûts-bénéfices,

5. *Stern Review on the Economics of Climate Change*, octobre 2006, http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20100407011151/http://www.hm-treasury.gov.uk/sternreview_index.htm

que les dommages causés par le réchauffement de la planète seraient 5 à 20 fois supérieurs aux sacrifices que les systèmes économiques devraient supporter pour lutter efficacement contre l'effet de serre. Ce message, abondamment médiatisé à l'époque, a contribué à forger un consensus international sur la nécessité et l'urgence d'agir, même si ses bases méthodologiques ont donné lieu, au moment de la publication, à de vifs débats.

Notamment, l'appréciation d'effets sur le long terme, dans une approche classique coûts-bénéfices, pose la question du coefficient d'actualisation utilisé, qui doit nécessairement être faible (N. Stern a utilisé un taux de 0,1 % et un taux de croissance à long terme de 1,3 %) pour que les moyen et long termes aient du poids.

II. Au plan micro-économique, la rentabilité des mesures de réduction des consommations d'énergies fossiles et de réduction des émissions de GES associée est d'autant plus faible que le prix des énergies fossiles, auxquelles on veut donner des substituts, est bas. En l'état actuel des prix du marché, il n'y a pas de modèle économique pour les agents, entreprises ou particuliers, sans valorisation des externalités liées au changement climatique ou contraintes législatives et réglementaires fortes (et effectivement respectées...).

La valorisation, implicite ou explicite de ces externalités, peut se faire par des dispositifs de subvention, ce qui pose la question des ressources budgétaires qui les financent, soit par la voie de la fiscalité, par exemple sous forme d'une taxe CO₂. Dans ce dernier cas, s'agit-il d'un alourdissement net de la fiscalité ou d'une restructuration de la fiscalité, à taux de prélèvement global constant, pour qu'elle soit incitative à une économie, une consommation ou des investissements décarbonés?

III. La « décarbonation » de nos modes de vie et de production pose la question du lien entre croissance et consommation d'énergie, question qui se pose en des termes différents entre les pays selon leur degré de développement.

L'accord de Paris est basé sur le schéma suivant :

- la poursuite de la croissance dans les pays développés est décorrélée des émissions de GES;
- pour les pays intermédiaires ou en développement, il est admis que leurs émissions de GES augmentent, en niveau absolu et par habitant ou par unité de PIB, dans un premier temps de croissance de leur économie, puis diminuent, car ils sont supposés rejoindre, ensuite, la trajectoire des pays développés.

Ce sont donc les pays développés qui doivent fournir les efforts de réduction d'émission les plus intenses, en début de période. Les phénomènes de changement climatique étant cumulatifs, il n'est pas illégitime que la répartition des efforts entre les pays tienne compte des quantités de GES émises depuis la période de révolution industrielle. En tout cas, cette répartition inégale des efforts de réduction des émissions, en particulier durant la première période, a été, avec les engagements pour doter de 100 milliards de dollars par an le Fonds vert pour le climat, principal instrument multilatéral d'aide aux pays pauvres et vulnérables en matière de climat, un élément essentiel dans l'aboutissement d'un accord unanime entre les pays participants de la COP21.

Plusieurs observations peuvent être faites sur ce schéma :

- il ne prend pas en compte les interrogations actuelles sur les gains de productivité et, donc, sur les gisements de croissance que contient la révolution technologique en cours, basée sur le numérique;
- est-il suffisant pour atteindre les objectifs? N'est-ce pas une révision plus radicale – et moins consommatrice – des modes de vie des individus et d'organisation des sociétés, qui est nécessaire, alors même que tous les individus « n'ont pas leur compte » dans la situation actuelle?
- les outils de mesures économiques comme le PIB ne sont pas réellement adaptés à la valorisation des évolutions souhaitées.

IV. La transition liée à la lutte contre le changement climatique offre aussi aux pays technologiquement développés des opportunités de créations de nouvelles activités industrielles ou de services.

Dans beaucoup de cas, l'exportation d'innovations passe par l'aboutissement préalable de réalisations dans le pays d'origine des entreprises cherchant à exporter. Cette volonté de favoriser l'émergence de nouvelles activités profitables est très présente dans les choix énergétiques allemands.

LES ENGAGEMENTS PAR PAYS : INTENDED NATIONALLY DETERMINED CONTRIBUTION (INDC)

Sont donnés ici quelques exemples commentés d'engagement déposés par un certain nombre de pays, à l'automne 2015, avant la tenue de la conférence de Paris.

Nota 1 : les objectifs affichés par les pays ne sont pas tous formulés dans les mêmes unités : selon qu'ils sont évalués en tonne de CO₂ par habitant ou par unité de PIB, selon les hypothèses implicites de croissance de la population ou du PIB sur les 20 prochaines années, les quantités totales émises par le pays peuvent, à terme, être très différentes.

Nota 2 : les seules statistiques détaillées par pays, qui soient disponibles, sont anciennes (année 2011) et ne concernent que les émissions de CO₂, pas celles d'autres gaz à effet de serre, avec leur coefficient d'équivalence.

LES ÉTATS-UNIS

Population : 314,9 millions; Production CO₂ : 16,85 t/h (11^e rang); PNB : 49 277 \$/h⁶

Les États-Unis s'engagent dans leur *INDC* à réduire leurs émissions par rapport à 2005 de 17 % en 2020 et de 26 à 28 % en 2025. Il faut noter que l'objectif pour 2020 consiste à revenir un peu au-dessus des émissions de 1990-1991. Pour parvenir à ce résultat, les États-Unis citent une série de lois et réglementation existantes ou en cours, mais sans précision sur les moyens.

LA CHINE

Population : 1 368,4 millions; Production CO₂ : 6,59 t/h (44^e rang); PNB : 10 092 \$/h

Les engagements de la Chine consistent à réduire les émissions de CO₂ de 40-45 % par unité de PIB en 2020 par rapport à 2005. Sachant que ces émissions auraient été réduites de 33,8 % en 2014 par rapport à 2005, ceci correspond à un effort de réduction supplémentaire de 18 à 33 % par unité de PIB en 2020 par rapport à 2014. Compte tenu de la croissance probable du PIB, ceci devrait correspondre en pratique à une augmentation des émissions significative. Dans ce cadre, la Chine prévoit d'augmenter la part des combustibles non fossiles dans la consommation d'énergie primaire de 11,2 % en 2014 à 15 % en 2020 et d'augmenter les surfaces forestières d'une vingtaine de millions d'hectares. Par ailleurs, la Chine prévoit atteindre le pic de ses émissions totales de CO₂ en 2030.

6. Source : *Carbon Dioxide Information Analysis Center (CDIAC), US Department of energy (DOE)*, données 2011.

L'INDE

**Population : 1 221,1 millions ; Production CO₂ : 1,69 t/h (114^e rang) ;
PNB : 4 786 \$/h**

Comme la Chine, l'Inde prévoit de réduire ses émissions par unité de PIB, mais seulement de 33-35 % en 2030 par rapport à 2005, ce qui devrait correspondre à une forte augmentation des émissions totales. Dans ce cadre, l'Inde prévoit de porter la capacité de production d'électricité hors combustibles fossiles à 40 % de la capacité installée et de créer 2,5 à 3 milliards de tonnes de puits d'équivalent CO₂ par un accroissement de la couverture forestière.

L'UNION EUROPÉENNE

**Population : 508,7 millions ; Production CO₂ : 7,04 t/h (40^e rang) ;
PNB : 34 364 \$/h**

L'Union européenne s'engage à une réduction de 40 % de ses émissions de gaz à effet de serre en 2030 par rapport à 1990 en rappelant ses engagements antérieurs de réduire ses émissions de 20 % entre 1990 et 2020 et le fait que ces émissions ont déjà été réduites de 19 % dès 2012. Les émissions sont donc passées de 12 tonnes d'équivalent CO₂ par habitant à 9 tonnes en 2012, en visant 6 tonnes en 2030.

L'ÉGYPTE

**Population : 79,4 millions ; Production CO₂ : 2,78 t/h (94^e rang) ;
PNB : 10 631 \$/h**

Le document remis par l'Égypte rappelle les circonstances particulières dans lesquelles le pays se trouve placé : croissance attendue de la population (croissance annuelle supérieure à 2 % jusqu'en 2040) et du PIB, avec un accent mis sur de grands projets (+ 5 % par an) ; amélioration des indicateurs sociaux. Il insiste sur les effets négatifs attendus du changement climatique : diminution des rendements

agricoles (de près de 20 % pour les céréales, d'ici 2050); submersion des zones littorales du delta...

Il donne ensuite des indications assez exhaustives, mais très générales, sur les moyens de réduire les émissions de GES, sans aucun objectif chiffré. Il évalue, enfin, les investissements à réaliser sur la période 2020-2030 à 73 MM \$, pour lesquels le support international est attendu.

L'AFRIQUE DU SUD

Population : 52 millions; Production CO₂ : 9,19 t/h (27^e rang); PNB : 12 197 \$/h

L'Afrique du Sud présente des outils de planification qui intègrent élimination de la pauvreté, éradication des inégalités et lutte contre le changement climatique. L'objectif affiché est un niveau d'émissions de GES en 2025 et 2030 entre 398 et 614 Mt d'équivalent CO₂, à comparer à un niveau actuel de 477 Mt; l'évolution prévue sur la période comporte d'abord une croissance des émissions puis un plateau et enfin une décroissance. Sont également données des estimations des investissements qui sont prévus, à la fois pour réduire les émissions et lutter contre les conséquences du changement climatique.

L'ÉTHIOPIE

Population : 89,4 millions; Production CO₂ : 0,084 t/h (184^e rang mondial); PNB : 1 172 \$/h

L'Éthiopie affiche un objectif de niveau d'émission de GES, en 2030, identique, en niveau absolu, par rapport à ce qu'il est en 2010, ce qui représente un effort de réduction de 64 % par rapport à la prévision de croissance de sa population et de développement de son économie. Elle prévoit également de devenir exportatrice d'électricité « verte », d'origine hydraulique, dans sa région.

Propositions de la Commission de l'Union européenne

Le 30 novembre 2016, la Commission européenne a rendu publique une proposition de réforme des marchés de l'énergie intitulée *Clean Energy for all Europeans*, plus connue sous l'appellation de *Winter Package*. La chaire Économie du Climat de l'université Paris-Dauphine et de Montpellier a publié en février 2017 une analyse de ce document de 5 000 pages sous le titre « Le *Winter Package* : quelles ambitions pour quelle cohérence ? », qui étudie les principales questions suivantes :

- remettre le consommateur au centre des politiques ;
- renforcer la gouvernance des réseaux et des marchés ;
- améliorer l'intégration des renouvelables ;
- la question de la tarification de l'électricité ;
- le rôle central du prix du carbone.

Nous publions ce document en annexe 2 avec l'aimable autorisation des auteurs.

La France est-elle sur le bon chemin?

La France est-elle sur le bon chemin pour tenir son engagement de la COP21 en 2030 pour ce qui concerne les émissions de gaz à effet de serre? Nous avons essayé de répondre à cette question en nous basant sur les données du CITEPA.

LE DIAGNOSTIC DE L'EXISTANT

La lecture du tableau SECTEN du CITEPA⁷ (joint en annexe 1) donne les chiffres d'émissions de gaz à effet de serre en millions de tonnes d'équivalent CO₂ (M de Teq) des différents secteurs, dont est soustrait le puits de carbone des changements d'affectation des sols, et la foresterie (UCTAF) jusqu'en 2016.

L'objectif de la COP21 est ambitieux puisqu'après une réduction de 100 M de Teq en 26 ans (de 511 à 411 M de Teq de 1990 à 2016), il faudrait encore une réduction de 104 M de Teq en 14 ans (de 411 à 307 de 2016 à 2030).

7. CITEPA Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique.

Depuis 1990, nous avons gagné 100 M de Teq, soit approximativement la moitié du nécessaire, et il nous en resterait 104 à trouver d'ici 2030, soit 6,5/an. À regarder de plus près la rétrospective 1990-2016, on constate qu'elle se décompose en quatre parties :

- 1990-2000 marquées par une quasi-stabilité des émissions françaises. Les effets des deux transitions énergétiques engagées au dernier siècle, le programme électronucléaire et le réseau gaz, ont permis de compenser les effets de la croissance, notamment pour le résidentiel tertiaire et l'explosion des consommations du transport.
- 2000-2006. Les émissions nettes baissent de 8 M de Teq/an.
- 2006-2012 a connu la crise, d'où un recul très fort des émissions de l'industrie, passant de 134 à 103 M de Teq. L'activité du transport marchandise subit aussi ce choc, les émissions globales du transport passant de 133 à 125 M de Teq. Les émissions nettes baissent de 8,8 M de Teq/an.
- 2012-2016. Ces années ont été marquées, rappelons-le, par une croissance anémique. Pourtant, la baisse annuelle tombe à 2,7 M de Teq/an. Ce résultat est décevant, alors que l'on aurait pu s'attendre à ce que les effets des politiques lancées lors du Grenelle de l'environnement et du débat sur la transition énergétique donnent de meilleurs résultats.

Nous constatons que les progrès de ces quatre dernières années sont dus à trois secteurs sur cinq :

A) *Les industries de l'énergie* (la production électrique, les raffineries et les centrales de chauffe), avec un léger retour à la hausse en 2016. Les raffineries se sont adaptées et le contenu carbone de l'électricité touche une limite inférieure à un peu plus de 40 g CO₂/kWh.

B) *Les industries manufacturières*. Certains observateurs estiment que la désindustrialisation aurait été enrayée depuis 2015, ce qui se voit dans les chiffres, les émissions de ce secteur passant de 103 à 96, et se stabilisant à partir de 2015.

C) *Le résidentiel-tertiaire* voit ses consommations très fortement impactées par les caractéristiques climatiques des différentes années. Pour évaluer ces tendances, il convient donc de corriger les statistiques annuelles par un facteur climatique. Depuis 2000, l'apport structurel annuel de ce secteur est de l'ordre de 1,33 M de Teq, soit 4 M de Teq tous les trois ans.

En revanche,

D) *Le transport*, quasi stable depuis 2008, connaît lui aussi une légère hausse en 2015 et 2016.

E) *L'agriculture* stagne.

La France a depuis 1990 réalisé de grandes économies d'émissions, en grande partie dues à une très regrettable désindustrialisation post crise de 2008 qui a non seulement fait disparaître 15 % de l'industrie, mais aussi sérieusement touché l'activité transport de marchandises.

Mais aussi pour de bonnes raisons :

Nos forêts qui s'étendent fixent davantage de carbone. Une des mesures les plus efficaces pour capter du gaz carbonique est de transformer des taillis vieillissants en futaies pour en faire du bois d'œuvre, opération qui libère de suite du bois qui peut remplacer du fioul ou du gaz.

La finalisation du parc nucléaire et le remplacement d'une grande part des parcs charbon et fioul par du gaz pour le système électrique.

L'extension du réseau gaz qui a fait reculer le fioul polluant.

L'isolation du parc ancien qui a compensé les émissions des logements neufs.

Des gains réguliers de consommations unitaires des véhicules neufs qui ont compensé la croissance du trafic.

Des progrès continus d'efficacité énergétique dans l'industrie.

EN PROLONGEANT CES TENDANCES, QUELLES PERSPECTIVES POUR 2030 ?

À cette cadence 2012-2016 de 2,7 MTeq/an, nous ne baisserions sur 2016-2030 que de $2,7 \times 14 = 38$ MTeq, soit très loin des 104 MTeq nécessaires pour tenir les objectifs qu'a pris la France organisatrice de la COP21.

L'analyse des progrès envisageables par secteur confirme cet ordre de grandeur.

Le résidentiel-tertiaire sur sa lancée gagnerait 18 MTeq.

La production électrique pourrait, en remplaçant la totalité des parcs charbon et fioul par du gaz, économiser environ 6 Mteq.

L'industrie, que nous espérons stabilisée, et même en légère croissance, pourrait poursuivre une productivité énergétique de 1,5 %/an, soit un gain d'environ 20 MTeq d'ici 2030.

Aucun signe venant du passé récent ne nous permet de penser que le transport et l'agriculture pourraient nous apporter une contribution significative.

La prolongation des tendances nous permettrait d'espérer un gain compris entre 40 et 50 MTeq, très inférieur aux 104 MTeq nécessaires entre 2016 et 2030 pour tenir nos engagements COP21.

Jusqu'ici, ce sont surtout les entreprises qui ont réalisé nos progrès. La société civile a globalement stationné.

Face à ce constat, quel choix pour la France, donc pour tous les Français : nous résigner à une réduction de 30 % de nos émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2030, alors que notre promesse était de réaliser 40 %, ou réagir en appliquant des mesures plus ambitieuses ?

La France, pays organisateur du succès de la COP21, sera-t-elle au rendez-vous de 2030 ?

Annexe 1 : Émissions dans l'air en France métropolitaine

PRG

ÉMISSIONS DANS L'AIR EN FRANCE MÉTROPOLITAINE

Source CITEPA / format SECTEN - avril 2017

CITEPA-SERRE-secteur-d/PRG.xls

Tg CO ₂ e = Mt CO ₂ e	Transforma- tion énergie	Industrie manufacturière	Résidentiel / tertiaire	Agriculture /sy/vicul- ture hors UTCATF (**)	Transport routier	Autres transports (*)	TOTAL hors UTCATF (**)	UTCATF (**)	TOTAL avec UTCATF (**)	Hors total (¹)
1990	76	163	89	93	112	7,0	541	-29	511	20
CO ₂ biomasse hors bilan (b)	4,0	6,3	33	0,2	0	0	43			
1991	77	171	104	92	115	7,1	567	-28	538	20
CO ₂ biomasse hors bilan (b)	4,4	6,4	39	0,2	0	0	50			
1995	65	160	92	91	121	7,2	536	-36	500	21
CO ₂ biomasse hors bilan (b)	5,2	6,7	32	0,1	0,4	0,0	44			
2000	68	148	95	94	129	7,9	542	-28	514	27
CO ₂ biomasse hors bilan (b)	6,4	6,9	27	0,2	0,9	0,0	41			
2001	60	140	109	94	133	7,7	543	-39	504	26
CO ₂ biomasse hors bilan (b)	6,9	6,9	28	0,2	0,9	0,0	43			
2002	63	140	100	92	134	7,7	537	-47	490	26
CO ₂ biomasse hors bilan (b)	7,4	7,2	25	0,2	0,9	0,0	41			
2003	67	141	104	90	134	7,3	542	-51	491	26
CO ₂ biomasse hors bilan (b)	7,8	7,4	27	0,2	0,9	0,0	44			
2004	65	136	106	91	135	7,1	541	-52	489	28
CO ₂ biomasse hors bilan (b)	8,1	7,5	28	0,2	0,9	0,0	44			
2005	70	136	107	90	133	7,0	542	-53	489	28
CO ₂ biomasse hors bilan (b)	7,9	7,7	28	0,2	1,7	0,0	45			
2006	66	134	101	90	133	6,7	529	-55	474	29
CO ₂ biomasse hors bilan (b)	7,7	8,1	27	0,2	2,0	0,0	45			

ANNEXE 1 : ÉMISSIONS DANS L'AIR EN FRANCE MÉTROPOLITAINE

2007	bilan secteur (a)	65	131	95	90	132	6,5	520	-55	465	30
	CO ₂ biomasse hors bilan (b)	8,0	8,8	25	0,2	4,0	0,1	46			
2008	bilan secteur (a)	64	124	101	91	126	6,4	512	-54	458	29
	CO ₂ biomasse hors bilan (b)	8,3	9,6	27	0,2	6,5	0,1	52			
2009	bilan secteur (a)	62	109	100	90	124	6,3	491	-49	442	28
	CO ₂ biomasse hors bilan (b)	8,7	9,6	28	0,2	6,9	0,1	53			
2010	bilan secteur (a)	61	113	102	89	127	6,3	499	-43	455	28
	CO ₂ biomasse hors bilan (b)	9,1	9,5	32	0,2	6,7	0,1	58			
2011	bilan secteur (a)	53	109	88	89	127	6,4	472	-40	432	29
	CO ₂ biomasse hors bilan (b)	9,4	9,7	26	0,3	6,6	0,1	52			
2012	bilan secteur (a)	54	103	95	88	125	6,6	471	-49	422	28
	CO ₂ biomasse hors bilan (b)	9,8	7,8	29	0,6	6,7	0,1	54			
2013	bilan secteur (a)	53	101	97	87	125	6,4	469	-49	421	27
	CO ₂ biomasse hors bilan (b)	10,4	7,2	33	0,7	6,7	0,1	59			
2014	bilan secteur (a)	40	98	82	90	125	6,1	441	-44	397	26
	CO ₂ biomasse hors bilan (b)	10,6	7,0	28	0,7	7,4	0,1	54			
2015	bilan secteur (a)	42	95	86	89	126	6,1	445	-40	405	27
	CO ₂ biomasse hors bilan (b)	11,2	7,2	29	0,7	7,5	0,1	56			
2016 (e)	bilan secteur (a)	45	96	88	89	127	6,3	451	-40	411	26
	CO ₂ biomasse hors bilan (b)	11,6	7,4	30	0,7	7,4	0,1	57			

(a) Bilan secteur net hors émissions CO₂ des énergies renouvelables, en particulier issues de la biomasse.

(b) CO₂ issu de la combustion de la biomasse, hors bilan CO₂ du secteur.

(*) selon définitions de la CCNUCC - les émissions reportées hors total ne sont pas incluses, à savoir les émissions fluviales, maritimes et aériennes internationales, ainsi que les émissions des sources non anthropiques.

(**) Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des Terres et Forêt

(e) estimation préliminaire

PRG

ÉMISSIONS DANS L'AIR EN FRANCE MÉTROPOLITAINE

Source CITEPA / format SECTEN – avril 2017

CITEPA-SERRE-secteur/PRG.xls

Tg CO ₂ e = Mt CO ₂ e	Transfor- mation énergie	Industrie manufac- turière	Résidentiel / tertiaire	Agriculture/syl- viculture hors UTCATF (**)	Transport routier	Autres trans- ports (*)	TOTAL hors UTCATF (**)	UTCATF (**)	TOTAL avec UTCATF (**)	Hors total (*)
1990	76	163	89	93	112	7,0	541	-29	511	20
1991	77	171	104	92	115	7,1	567	-28	538	20
1995	65	160	92	91	121	7,2	536	-36	500	21
2000	68	148	95	94	129	7,9	542	-28	514	27
2001	60	140	109	94	133	7,7	543	-39	504	26
2002	63	140	100	92	134	7,7	537	-47	490	26
2003	67	141	104	90	134	7,3	542	-51	491	26
2004	65	136	106	91	135	7,1	541	-52	489	28
2005	70	136	107	90	133	7,0	542	-53	489	28
2006	66	134	101	90	133	6,7	529	-55	474	29
2007	65	131	95	90	132	6,5	520	-55	465	30
2008	64	124	101	91	126	6,4	512	-54	458	29
2009	62	109	100	90	124	6,3	491	-49	442	28
2010	61	113	102	89	127	6,3	499	-43	455	28
2011	53	109	88	89	127	6,4	472	-40	432	29
2012	54	103	95	88	125	6,6	471	-49	422	28
2013	53	101	97	87	125	6,4	469	-49	421	27
2014	40	98	82	90	125	6,1	441	-44	397	26
2015	42	95	86	89	126	6,1	445	-40	405	27
2016 (e)	45	96	88	89	127	6,3	451	-40	411	26

(*) selon définitions de la CCNUCC – les émissions répétées hors total ne sont pas incluses, à savoir les émissions internationales, maritimes et aériennes internationales, ainsi que les émissions des sources non anthropiques.

(**) Utilisation des Terres, Changement d'Affectation des Terres et Forêtierie

(e) estimation préliminaire

Annexe 2 : Propositions de la Commission européenne

LE *WINTER PACKAGE* : QUELLES AMBITIONS POUR QUELLE COHÉRENCE ?

Anna CRETTE⁸, Jacques PERCEBOIS⁹ et Boris SOLIER⁸

Le 30 novembre 2016, la Commission européenne a rendu publique une proposition de réforme des marchés de l'énergie intitulée « Clean Energy for all Europeans », plus connue sous l'appellation de « Winter Package ». Ce projet a pour ambition d'accélérer l'intégration des marchés électriques en Europe, de poursuivre la montée en régime des renouvelables et de l'efficacité énergétique tout en mettant le consommateur européen au cœur du dispositif. Ce Policy Brief décode le dossier de la Commission – pas moins de 5 000 pages – en dégagant ses trois innovations majeures et en

8. Université Paris-Dauphine, Chaire Économie du Climat.

9. Université de Montpellier, Chaire Économie du Climat.

approfondissant les deux questions qui restent en suspens en termes de tarification :

- **Remettre le consommateur au centre des politiques.** Concrètement, le consommateur doit pouvoir participer davantage au fonctionnement du marché électrique à la fois comme autoproducteur et comme fournisseur d’offres d’effacement.
- **Renforcer la gouvernance des réseaux et des marchés.** Les marchés de capacités nationaux doivent être ouverts aux autres États membres et à l’ensemble des technologies. La seule exception concerne les centrales à charbon, les plus polluantes, qui devraient en être totalement exclues à terme.
- **Améliorer l’intégration des renouvelables.** Le projet met fin à la priorité d’accès aux réseaux dont bénéficiaient les renouvelables jusqu’à présent et recommande la suppression à terme des mécanismes de soutien à la production.
- **La question de la tarification de l’électricité** paraît incontournable dans le contexte d’injections croissantes d’électricité renouvelable décentralisée qui déstabilisent le principe historique de tarification de l’électricité au coût marginal. Des voies alternatives – tarification au coût moyen, ou à la puissance – devront être explorées.
- **Le rôle central du prix du carbone** et les implications de ses niveaux trop faibles pénalisant la compétitivité des énergies bas-carbone sont occultés. La réforme des mécanismes de soutien aux renouvelables ne saurait se substituer à une politique ambitieuse de tarification du carbone.

* * *

Le « *Clean Energy for all Europeans* », plus connu sous le nom de « *Winter Package* », a été rendu public le 30 novembre 2016 et s’inscrit dans la ligne des trois Directives déjà en vigueur depuis 1996 et de divers textes publiés en 2015 et 2016, notamment le « *Climate and Energy Package* ». Son ambition est d’accélérer l’intégration des

marchés de l'électricité en Europe en introduisant des règles de gouvernance plus solidaires, de poursuivre l'intégration des énergies renouvelables et les efforts portant sur l'efficacité énergétique, mais aussi de permettre au consommateur européen de mieux participer au marché et de bénéficier de droits plus importants. Le consommateur européen doit pouvoir accéder à une énergie « propre, sûre et abordable ». Toutefois les ambitions du document (plus de 1 000 pages et 4 000 pages d'annexes) sont modestes concernant l'instauration d'un prix élevé du carbone et certaines questions, comme l'impact d'une proportion élevée de renouvelables sur le fonctionnement du « merit order », ne sont pas soulevées. Les recommandations de ce « *Winter Package* » (WP) devraient être adoptées en 2017 pour une entrée en vigueur entre 2020 et 2021. Mais les objectifs recherchés ne sont pas toujours clairs et soulèvent parfois des questions de cohérence.

S'agissant des objectifs chiffrés les plus significatifs, le WP entérine pour l'essentiel ceux énoncés dans le paquet énergie-climat 2030, à savoir atteindre en 2030 une proportion de 27 % de renouvelables dans le mix énergétique de l'Union européenne, améliorer de 30 % l'efficacité énergétique et faire baisser de 40 % par rapport à 1990 les émissions de gaz à effet de serre. Mais les engagements concernent l'Union en tant que telle et les États-membres n'ont plus d'objectifs contraignants. La Commission peut toutefois adresser des observations ou remontrances aux États mais chacun reste libre de ses choix pour atteindre les objectifs communs.

1. LE CONSOMMATEUR EUROPÉEN AU CŒUR DU DISPOSITIF

Le WP recommande de porter plus d'attention au consommateur. Ce consommateur, qui va devenir un producteur potentiel important d'électricité renouvelable, doit pouvoir participer davantage au fonctionnement du marché à la fois comme autoproducteur et comme fournisseur d'offres d'effacement. Le développement des compteurs et réseaux intelligents ainsi que celui du stockage vont lui permettre

de participer plus directement à l'équilibre entre l'offre et la demande. Selon le WP, les consommateurs ont le droit de produire, stocker, de consommer et de vendre de l'électricité autoproduite soit individuellement soit via un agrégateur. De plus, les tarifs d'utilisation des réseaux doivent refléter les coûts que ce soit pour l'injection ou le soutirage. Le « net metering¹⁰ » n'est toutefois pas autorisé, ce qui est logique puisque les coûts du kWh et ceux des réseaux ont des chances d'être très différents selon les heures et les lieux d'injection et de soutirage.

Les droits du consommateur doivent également être mieux préservés, notamment en développant l'information sur les offres tarifaires des fournisseurs afin de favoriser le changement de fournisseur considéré comme insuffisant par la Commission, et en proposant de façon plus systématique des offres tarifaires « dynamiques » qui reflètent mieux les prix du marché de gros en temps réel. La proposition prévoit qu'un changement de fournisseur doit pouvoir se faire en trois semaines et gratuitement. Dans le même temps le WP demande l'abolition à terme des tarifs réglementés (cela concerne le tarif « bleu » encore en vigueur en France) à l'exception des tarifs sociaux. Notons que l'abolition des tarifs sociaux est une position défendue depuis plus de trois ans par l'ACER¹¹, le régulateur européen de l'énergie. Mais même dans ce domaine le WP recommande de recourir à terme à d'autres mécanismes comme par exemple le chèque « énergie », les tarifs sociaux devant disparaître sous cinq ans après l'entrée en vigueur de la nouvelle directive. À noter que si les prix payés par le consommateur final doivent refléter davantage les conditions de marché et les coûts des réseaux, cela incite à mettre en place des prix d'accès aux réseaux différenciés selon les heures et le lieu de soutirage, ce qui semble

10. Avec le net metering, il y a stricte compensation quantitative entre les kWh soutirés et les kWh injectés, sans tenir compte du lieu et de la période de soutirage et d'injection.

11. Voir "ACER Annual Activity Report for the year 2014", ACER, May 2015.

condamner à terme la péréquation spatiale des tarifs chère à la France.

2. UNE MEILLEURE GOUVERNANCE AU NIVEAU DES RÉSEAUX ET DES MARCHÉS

Le développement des interconnexions transnationales, une meilleure harmonisation des normes et un rôle accru donné à l'ACER devraient permettre de réduire les congestions aux frontières et de faciliter une meilleure convergence des prix de gros. Le WP introduit l'obligation pour les États d'élaborer d'ici 2019 des plans « énergie-climat » couvrant la période 2021-2030 et ces plans devront être mis à jour en 2024.

Les prix de l'électricité sur les marchés de gros qui ont fortement diminué ces dernières années ne permettent plus d'envoyer un signal-prix pour des investissements nouveaux au niveau de la production. Il faut donc instaurer rapidement des mécanismes de capacité pour éviter la mise sous cocon ou la fermeture de centrales qui peuvent pourtant s'avérer nécessaires pour la sécurité d'approvisionnement. C'est à l'ENTSOE (association européenne des gestionnaires de réseaux d'électricité) qu'incombe de fixer les besoins en ce domaine, ce que contestent d'ailleurs les États qui considèrent que cette programmation relève de prérogatives nationales, ce qui n'empêche d'ailleurs pas l'ENTSOE de vérifier la cohérence des plans nationaux au niveau européen et d'émettre des avis. La responsabilité de la sécurité d'approvisionnement relève des États et le calcul des besoins de capacité ne peut donc être fixé qu'à un niveau national.

Concernant ces mécanismes de capacité qui se mettent en place, que ce soit via une réserve comme en Allemagne ou via des marchés dans de nombreux pays dont la France¹², la Commission

12. Voir « Mécanisme de capacité. Rapport d'accompagnement et proposition de règles », RTE, Avril 2014.

demande que les paiements de capacité qui en résulteront ne soient pas utilisés comme une subvention déguisée au profit des exploitants de centrales utilisant des combustibles très carbonés. En proposant un critère de performance en CO₂ de 550 g de CO₂ par kWh dans un premier temps pour les nouvelles installations puis pour toutes les installations 5 ans après l'entrée en vigueur du texte, la Commission espère envoyer un signal pour le futur. Mais cela aura peu d'impact à court terme sur le parc thermique existant et les centrales à charbon en fonctionnement pourront donc a priori continuer de participer au mécanisme de capacité. Il y a à ce niveau un problème de cohérence entre l'objectif de sécurité des approvisionnements et l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Tableau 1 | Facteurs d'émission de CO₂ des centrales électriques en Europe (gCO₂/kWh).
Source : Chaire Économie du Climat, à partir des données de l'IPCC.

	Facteurs d'émission standard bruts (gCO ₂ /kWh primaire)	Rendements thermiques (min/max)	Facteurs d'émission net (gCO ₂ /kWh)
Charbon Lignite	364	35 % - 45 %	1040 - 810
Charbon Anthracite	340	35 % - 45 %	970 - 760
Gaz Naturel	202	40 % - 60 %	510 - 340

Les mécanismes de capacité, à l'exception des réserves stratégiques, doivent être ouverts à la participation des fournisseurs de capacités situés dans un autre État-membre, dès qu'une interconnexion existe. Tout mécanisme de capacité doit dorénavant passer le test de la discipline des subventions d'État et les règles concernant ces aides ont été standardisées. Les États n'ont pas non plus le droit d'empêcher les capacités domestiques de participer à un mécanisme de capacité étranger. Cela pourrait inciter à une meilleure convergence des

mécanismes de capacité entre États-membres car la Commission regrette qu'il y ait aujourd'hui autant de mécanismes de capacité différents pour assurer cette sécurité de fourniture. Ajoutons que la rémunération des capacités doit être fixée selon des mécanismes de concurrence et non directement par les pouvoirs publics. Le mécanisme de capacité devrait être ouvert à tout type de capacité, l'effacement comme les énergies renouvelables. On peut toutefois s'interroger sur l'intérêt de faire profiter les énergies renouvelables du mécanisme de capacité lorsque celles-ci bénéficient déjà d'un soutien sous forme d'un complément de rémunération. N'y aurait-il pas double dividende pour ces énergies ?

Une meilleure coopération des gestionnaires européens de réseaux est également demandée, dans le transport comme dans la distribution. Cela concerne les codes de réseaux qui doivent être unifiés sous l'autorité de l'ACER. Il s'agit notamment de faire face à des situations de crise et d'accroître le secours mutuel. À noter que les décisions au niveau du « *board of regulators* » seront prises à la majorité simple et non plus à la majorité des deux tiers. Visiblement la Commission cherche à transférer une partie des pouvoirs de régulation du niveau national au niveau européen.

Concernant les marchés *day-ahead* et *intraday* le plafonnement des prix de gros (price-caps en général fixés à 3 000 euros/MWh) doivent disparaître sauf s'ils sont fixés à hauteur de la « *value of lost load* » qui devrait être proche du coût de défaillance, lequel est généralement supérieur à 10 000 euros/MWh. Les prix-plancher sur les marchés de gros (fixés à -500 euros/MWh actuellement) seront également supprimés sauf s'ils sont fixés à -2 000 euros/MWh ou en deçà. Il est prévu également que le règlement des écarts devra se faire toutes les quinze minutes à partir de 2025. Ces mesures renforcent l'intérêt d'un marché de capacité.

La CRE, le régulateur français, partage le point de vue selon lequel « les ressources, qu'il s'agisse de production, de stockage ou d'effacement de la demande, devraient pouvoir participer aux marchés dans

des conditions de concurrence équitables »¹³. Tout cela s'inscrit bien dans une logique de plus grande flexibilité des marchés, en particulier la flexibilité du côté de la demande d'électricité. Mais la CRE semble douter que le cadre institutionnel actuel puisse permettre aux citoyens et aux acteurs locaux de s'impliquer réellement sur ces marchés, et ce d'autant que certaines dispositions du « troisième paquet » n'ont pas encore été mises en œuvre. Elle rappelle que la bonne coopération des régulateurs nationaux au sein de l'ACER est un facteur clé du succès, ce qui revient à dire que l'équilibre des pouvoirs entre les régulateurs nationaux et l'ACER ne doit pas être rompu trop vite. Pour beaucoup d'États il importe de procéder « par paliers », avec une articulation efficace entre les divers niveaux de gouvernance, locale, nationale, régionale et européenne et de respecter le principe de subsidiarité.

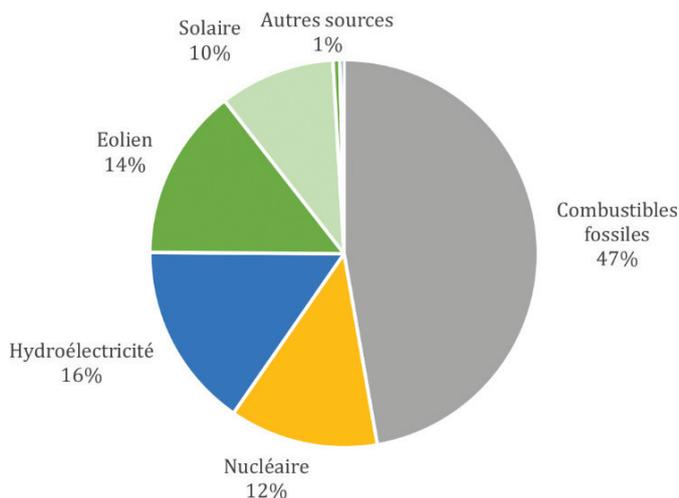


Figure 1 | Part des énergies renouvelables dans les puissances électriques installées en 2015 de l'UE 28. Source : Chaire Économie du Climat, à partir des données d'Eurostat.

13. Voir « Réactions de la CRE au paquet énergie propre ». CRE, Document de Position, Janvier 2017.

3. DES AMBITIONS TIMORÉES POUR LA PÉNÉTRATION DES RENOUVELABLES ?

L'objectif de 27 % d'énergie renouvelable dans la consommation finale d'énergie de l'Union européenne à l'horizon 2030 est apparu comme modeste pour de nombreux observateurs par rapport à la tendance passée même si, officiellement, la Commission veut faire de l'Union européenne la première zone de déploiement des renouvelables dans le monde. Passer de 20 % en 2020 à 27 % en 2030 représente toutefois un effort moindre que l'effort supporté antérieurement. Le WP prévoit en outre de supprimer la priorité d'accès aux réseaux pour les renouvelables, à l'exception des installations de moins de 500 kW qui pourront continuer de bénéficier de soutiens du type « prix garantis » (*feed-in tariffs*) ou « complément de rémunération » (*feed-in premium*), le second système étant d'ailleurs privilégié, et à l'exception également des technologies les moins matures telles que la biomasse. Notons que le seuil de 500 kW sera abaissé à 250 kW en 2026, sauf si entre temps les capacités de renouvelables bénéficiant de la priorité du dispatching atteignent 15 % du total des capacités installées. Dans ce cas, le critère passe automatiquement à 250 kW. Ces mesures ne sont évidemment pas rétroactives et ne concernent que les nouvelles installations. On peut noter que ces aides ne se justifient plus si les énergies ont atteint leur seuil de compétitivité et de toutes les façons les énergies renouvelables seraient privilégiées au niveau de l'appel des centrales (« *merit order* ») puisque leur coût marginal (coût variable) est très faible voire nul. En revanche, elles ne seront plus prioritaires au niveau du dispatching effectué par le gestionnaire de réseau. En pratique le WP encourage le recours aux appels d'offre et recommande « la neutralité technologique », ce qui revient à privilégier la logique du « moins disant ». L'offre la moins chère est-elle toujours la meilleure du point de vue collectif ? Certains observateurs le contestent et préféreraient un recours à des appels d'offres spécifiques par technologies afin de maintenir une certaine diversité et complémentarité des

technologies ; ils craignent aussi que la fin de cette priorité d'accès ne pénalise certaines technologies.

Un État peut toutefois demander à la Commission de l'autoriser à maintenir la priorité d'injection pour les installations non-autorisées si l'abandon de cette priorité était de nature à mettre en péril l'équilibre du réseau ou à empêcher le pays d'atteindre ses objectifs en matière de renouvelables. La Commission considère qu'il faut accélérer l'innovation en faveur des énergies propres, ce qui passe par des aides au niveau de la recherche-développement. Notons que le nucléaire est quasi absent de ce document, ce qui n'est guère surprenant puisque la Commission ne le considère pas comme une « technologie propre », bien que ce soit une technologie « bas carbone ».

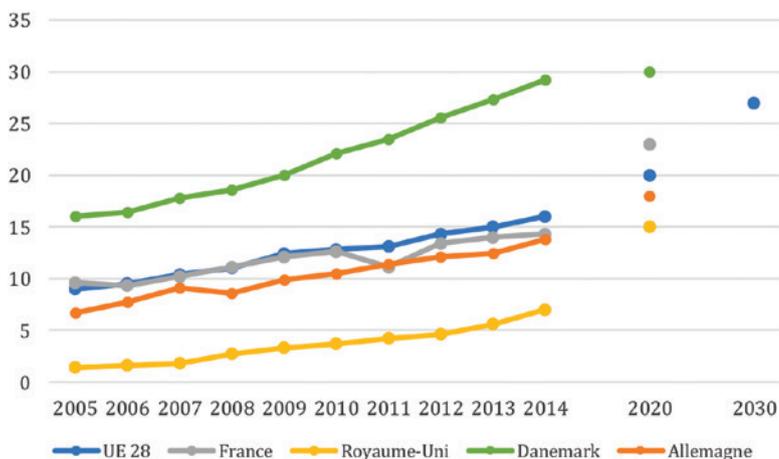


Figure 2 | Part des énergies renouvelables dans la consommation finale brute d'énergie et objectifs 2020/30. Source : Chaire Économie du Climat, à partir des données d'Eurostat.

4. TOUJOURS PLUS D'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE

Jusqu'ici la Commission européenne s'était fixé comme objectif une consommation d'énergie en 2020 identique à celle de 1990. Un nouvel objectif apparaît dans le WP : faire passer de 27 à 30 % l'objectif d'efficacité énergétique à l'horizon 2030. À cela s'ajoute un objectif d'économie d'énergie de 1,5 % par an entre 2021 et 2030 (soit 15 % au total), exprimé par rapport au volume total des ventes d'énergie. C'est ambitieux mais non irréalisable si des efforts importants sont faits au niveau des bâtiments et du transport. Les bâtiments sont à l'origine de 40 % de la consommation totale d'énergie dans l'Union et 75 % d'entre eux présentent une faible efficacité énergétique. La nouvelle directive sur la performance énergétique des bâtiments inclus dans ce WP devrait permettre d'accélérer le rythme de rénovation. En liaison avec la Banque Européenne d'Investissement et en collaboration avec les États-membres, la Commission considère qu'il faudrait constituer un fonds de l'ordre de dix milliards d'euros pour accélérer les économies d'énergie et la pénétration des renouvelables dans le bâtiment ; c'est le programme « financement intelligent pour bâtiments intelligents ». De même le développement massif du véhicule électrique devrait permettre de réduire la consommation d'énergie dans le secteur des transports, qui représente encore 30 % de toute l'énergie consommée. Mais cela suppose que l'on fasse de gros efforts au niveau des batteries et des installations de rechargement. Le développement à grande échelle des « smart grids » et des compteurs communicants est dès lors une priorité. La digitalisation (« le monde des objets connectés ») est perçue comme un moyen efficace d'accroître l'efficacité énergétique dans tous les secteurs.

5. ET LE CARBONE DANS TOUT CELA ?

La Commission rappelle que le système européen des quotas (EU ETS) demeure au cœur du dispositif pour réduire les émissions de CO₂ et pense que le retrait d'une partie des quotas devrait aboutir

à une remontée du prix de la tonne de CO₂, lequel rappelons-le demeure très bas aujourd'hui (environ 5 euros/tCO₂). Mais sans prix élevé du carbone les énergies fossiles ne sont pas pénalisées et la compétitivité des renouvelables est retardée. La récente décision française 2017 de financer le surcoût des renouvelables par les énergies fossiles (une partie de la taxe intérieure sur la consommation de produits énergétiques – TICPE – qui comprend elle-même une partie de taxe carbone) va dans le bon sens puisque cela revient à faire financer les renouvelables par les énergies carbonées. Or l'un des principaux freins à la remontée du prix carbone réside dans les interactions existantes avec les instruments nationaux des politiques énergétiques, au premier rang desquels le développement des énergies renouvelables, qui ne sont pas suffisamment coordonnés au niveau européen. Sur cet aspect, le WP demeure décevant, la Commission estimant que la révision des modes de soutien aux renouvelables, qui devront davantage reposer sur des mécanismes de marché à l'avenir, sera suffisante pour limiter les impacts négatifs de ces interactions sur le prix du carbone.

Si le projet de réforme de l'EU ETS qui fait l'objet d'une réforme distincte est susceptible de renforcer le signal prix du carbone à moyen terme, le mécanisme d'ajustement de l'offre de quotas proposé ne semble en revanche pas adapté aux difficultés posées par les interactions avec les politiques nationales. En effet, la proposition de réserve de stabilité qui vient d'être adoptée par le Parlement vise à moduler l'offre de quotas de façon automatique sur la base de critères quantitatifs qui n'intègrent pas les fondamentaux de marché. Pour restaurer l'efficacité du système européen et rétablir un prix du carbone suffisamment élevé et prévisible, il conviendrait que le critère d'intervention de la réserve fût défini en fonction de seuils de prix et non de quantités. Cela reviendrait à encadrer les variations de prix du carbone par un corridor dont les bornes inférieures et supérieures seraient un prix plancher et un prix plafond. Une autre voie pourrait consister à gérer de façon plus réactive l'offre de quotas afin

de contrôler l'effet des interactions avec les politiques nationales, en ajustant par exemple le plafond de quotas en fonction des injections d'électricité renouvelable¹⁴.

Dans le prolongement de la ratification de l'accord de Paris par les États membres, la Commission propose d'établir des nouvelles règles de mesure et de reporting des progrès accomplis dans la mise en œuvre des engagements européens. Le WP prévoit également que les États révisent leurs plans énergie-climat selon une périodicité identique au cycle de révision de 5 ans des engagements tel que prévu à l'accord de Paris.

6. QUESTIONS EN SUSPENS

Parmi les questions qui auraient mérité plus d'attention et qui vont émerger rapidement, celle d'une réforme de la tarification de l'électricité est sans doute la plus sensible. La logique du « *merit order* » retenue au niveau des marchés de gros de l'électricité consiste à appeler les centrales dans l'ordre de leur coût variable (coût marginal) croissant. Ainsi lorsqu'une centrale à charbon est marginale (cas d'une demande faible) elle récupère ses seuls coûts variables. Lorsque la demande s'accroît et qu'il faut faire appel à une centrale additionnelle dont le coût variable (coût en combustible pour l'essentiel) est supérieur, le prix d'équilibre est plus élevé et permet à la centrale à charbon de récupérer un « *mark-up* » qui lui permet de couvrir une partie de ses coûts fixes. La centrale à gaz quant à elle ne récupère que ses coûts variables mais elle pourra récupérer ses coûts fixes lorsqu'une centrale additionnelle à coût variable plus élevé sera sollicitée pour faire face à une demande plus forte.

L'injection massive de renouvelables du type photovoltaïque ou éolien soulève une question spécifique. Ces centrales renouvelables

14. Voir « Quelle réforme de l'EU ETS après l'accord de Paris et le Brexit ? » Chaire Économie du Climat, Policy Brief No. 2016-01, Juillet 2016.

« variables » ou « intermittentes » bénéficient de coûts variables nuls ou quasiment nuls ce qui fait que, même en l'absence d'un accès juridiquement prioritaire, elles seraient appelées avant toutes les autres centrales dont les coûts variables sont plus élevés (nucléaire, charbon, gaz). Mais elles ne sont pas appelées sur le réseau suffisamment longtemps pour récupérer leurs coûts fixes (20 à 40 % du temps seulement selon les cas). De plus elles ne sont pas appelées aux heures les plus chargées de l'année, le soir notamment, pour le solaire en tout cas, lorsque les prix du marché sont les plus rémunérateurs. Un développement massif et rentable du stockage (via des batteries ou des stations de pompage) leur permettrait d'injecter du courant aux heures les mieux payées mais c'est loin d'être le cas aujourd'hui. C'est la raison pour laquelle ces centrales sont rémunérées hors marché via des *feed-in tariffs* ou des *feed-in premiums*.

Que se passera-t-il lorsque la part des renouvelables dans le mix électrique sera très élevée si, dans le même temps, on met fin aux prix d'achat garantis et aux compléments de revenu ? Les prix du marché de gros seront très bas la plupart du temps et aucun producteur ne pourra récupérer ses coûts fixes. À la limite avec 100 % de renouvelables à coût marginal nul le prix du marché n'a plus de sens. On risque alors d'assister à la fermeture de centrales donc à un black-out ou à défaut il faudra compter sur une envolée des prix « spot » aux heures de pointe pour récupérer l'investissement des centrales encore en activité. Mais les gouvernements ne font pas confiance à un marché « *energy only* » qui se traduirait par des prix très élevés à certaines heures et c'est la raison pour laquelle les prix de gros sont « capés » à la hausse comme à la baisse (mesure qui devrait d'ailleurs disparaître selon le WP). Certes l'existence d'un mécanisme de capacité permet d'atténuer cela mais ne règle pas tout. C'est pourquoi nous pensons souhaitable de revoir complètement la logique actuelle de tarification de l'électricité. Il faudrait remplacer une tarification fondée sur les coûts marginaux par une tarification fondée sur les coûts moyens voire une tarification à la seule puissance : le

consommateur paie pour une puissance garantie et il appelle cette puissance lorsqu'il le souhaite. Toutes les politiques d'incitation à l'effacement aux heures de pointe seraient condamnées avec un tel système. Il importe aujourd'hui de réfléchir aux réformes tarifaires qui doivent être mises en œuvre tant que le problème stockage à grande échelle de l'électricité n'est pas réglé.

On peut noter qu'un problème de même nature se pose avec la tarification d'accès aux réseaux, le réseau de distribution notamment, avec le développement de l'autoconsommation de photovoltaïque. Aujourd'hui les péages d'accès aux réseaux sont assis pour partie sur la puissance souscrite et pour partie sur la quantité d'énergie (kWh) soutirée. La part « puissance » et la part « énergie » varient fortement selon les pays. En moyenne en Europe la part « puissance » est de l'ordre de 30 % et la part « énergie » de l'ordre de 70 % ; en Espagne la part « puissance » est proche de 80 % alors qu'elle n'est que de 30 % en France. Ainsi en France le consommateur paie le réseau lorsqu'il soutire de l'électricité puisque la part « énergie » atteint 70 %. À puissance souscrite donnée sur le réseau, l'auto-consommateur français de photovoltaïque ne participera au financement du réseau que dans la mesure où il sera conduit à soutirer de l'électricité de ce réseau, donc lorsque son installation solaire ne fonctionnera pas. Ce sont les autres consommateurs, ceux qui n'ont pas opté pour une installation solaire qui paieront pour lui et cela va engendrer des subventions croisées. Ce consommateur va ainsi se comporter comme un « passager clandestin ». C'est le syndrome « de la dernière maison », celle qui n'a pas choisi d'installation solaire et qui paie pour toutes les autres. Notons quand même que l'auto-consommateur (autoproduiteur) doit financer le raccordement au réseau de distribution donc paiera des coûts fixes mais restera exonéré de la CSPE (ou de son équivalent) pour la partie autoconsommée de sa production. Là encore il faudrait accroître la part « puissance » du tarif d'accès donc revoir la tarification.

RÉFÉRENCES

- Agency for the Cooperation of Energy regulators (ACER). (2015). ACER Annual Activity Report for the year 2014, May 2015.
- Commission de Régulation de l'Énergie (CRE). (2017). Réactions de la CRE au paquet énergie propre. Document de Position, Janvier 2017.
- De Perthuis, C., Solier, B. et Trotignon, R. (2016). Quelle réforme de l'EU ETS après l'accord de Paris et le Brexit ? Chaire Économie du Climat, Policy Brief No. 2016-01, Juillet 2016.
- European Commission (EC). (2015). Best practices on Renewable Energy Self-consumption. Staff Working Document COM(2015) 339 final, Brussels, July 2015.
- European Commission (EC). (2016). Clean Energy for All Europeans – unlocking Europe's growth potential. Press release IP/16/4009, Brussels, November 2016. Disponible à l'adresse : http://europa.eu/rapid/press-release_IP-16-4009_en.htm
- European Commission (EC). (2016). Final Report of the Sector Inquiry on Capacity Mechanisms. COM(2016) 752 final, Brussels, November 2016.
- Hansen, J-P., Percebois, J. (2015). Énergie : Économie et politiques. De Boeck, Seconde édition.
- Réseau de Transport d'électricité (RTE). (2014). Mécanisme de capacité. Rapport d'accompagnement et proposition de règles. Paris, Avril 2014.

DATES CLEFS DE LA POLITIQUE CLIMAT-ÉNERGIE EN EUROPE

1996 : Première directive sur le marché intérieur de l'électricité.

2003 : Seconde directive « électricité ».

2005 : Démarrage du système européen d'échange de quotas de CO₂ (EU ETS)

2008 : Adoption du paquet énergie-climat 2020 (20 % d'énergie renouvelable ; 20 % d'efficacité énergétique en plus ; 20 % de gaz à effet de serre en moins relativement à 1990).

2009 : Troisième directive « électricité ».

2011 : Roadmap 2050, fixant des objectifs sectoriels de réductions des émissions à l'horizon 2050

2014 : Annonce du paquet énergie-climat 2030 (27 % d'énergies renouvelables ; 27 % d'efficacité énergétique en plus et 40 % d'émissions de gaz à effet de serre en moins relativement à 1990).

2015 : Signature de l'Accord de Paris (COP-21)

Annexe 3 : Transports

Transports et émissions de gaz à effet de serre

TIRER LES CONSÉQUENCES DES ORIENTATIONS DE LA COP21

Le développement des transports décarbonés est principalement fondé sur la performance des moteurs et l'utilisation de sources d'énergie à faibles émissions de gaz à effet de serre. Conjugués avec les économies de mobilité et une meilleure utilisation des moyens de transport, ces leviers d'action permettent de poursuivre et d'amplifier le mouvement, observé depuis 2004, de baisse des émissions de GES des transports en France de l'ordre de 0,8 % par an, et d'atteindre (à l'horizon 2050) un facteur 2 de réduction des émissions de GES par rapport à l'année de référence 1990.

Mais ils ne répondent pas à l'objectif de long terme mis en évidence lors de la COP21, pour se rapprocher d'un facteur 4 de diminution des émissions de CO₂ des transports, en France et en Europe, et probablement bien au-delà. Les nouvelles orientations affichées dans ce sens par le gouvernement prévoient notamment pour les transports en France la suppression des carburants fossiles à l'horizon 2040 et la neutralité carbone en 2050.

Comment progresser efficacement vers cet objectif?

CHANGER DE PARADIGME POUR RECHERCHER LES BONNES TRAJECTOIRES D'ACTION

Pour mettre en œuvre une ambition à la hauteur des enjeux climatiques, une vision de long terme est indispensable si l'on veut prendre des décisions de court terme qui aillent dans le sens d'un développement véritablement durable.

Il faut changer de paradigme :

- se situer à un horizon de très long terme où la conjonction des progrès technologiques et des régulations économiques conduirait à des transports totalement décarbonés (au moins pour les transports intérieurs en France) ;
- coconstruire, avec les acteurs publics et privés concernés, les trajectoires technologiques et économiques jugées les plus pertinentes pour progresser le mieux possible vers cet objectif, en tenant compte des incertitudes ou aléas techniques et économiques¹⁵.

UNE CONDITION NÉCESSAIRE À TERME QUI RELÈVE DES POLITIQUES DE PRODUCTION ÉNERGÉTIQUE

Les besoins de déplacements des personnes peuvent difficilement être comprimés sans remettre en cause la performance de notre économie et la liberté de circulation des personnes et des biens.

Il faudra d'abord éviter les dispositions d'organisation des activités et des services de transport qui conduisent à multiplier les kilomètres parcourus sans modifier fondamentalement la satisfaction des

15. Afin d'apporter leur contribution à cette démarche, les Ingénieurs et Scientifiques de France ont publié, en septembre 2017, un Manifeste pour une mobilité sans carbone. Préparé par les deux comités IESF Énergie et Transports, ce manifeste propose un scénario de très long terme où tous les modes de transport n'utiliseraient plus que de l'énergie décarbonée. Il ouvre un débat (consultation de plusieurs dizaines d'experts des différentes disciplines concernées) en vue de mieux analyser les questions en suspens soulevées par ce scénario de long terme. Ce débat s'inscrit dans les contributions d'IESF aux Assises nationales de la mobilité que le gouvernement a lancées le 19 septembre 2017.

usagers, ce qui fut le cas du développement périurbain induit par la motorisation automobile... Et un phénomène analogue pourrait se produire avec l'arrivée prochaine des véhicules autonomes qui circuleraient sans conducteur et parfois sans passagers !

Mais il faut s'attendre à long terme à ce qu'un trafic automobile, même robotisé, reste du même ordre de grandeur que celui observé aujourd'hui (quelque peu inférieur si l'usage de la voiture partagée se généralise). Et donc trouver, en énergie/rendement électrique, l'équivalent des 50 millions de tep annuelles utilisées aujourd'hui par les transports intérieurs (tous modes).

On se place dans une perspective européenne de long terme où la production d'énergie électrique devra à la fois :

- satisfaire la demande d'énergie majoritairement électrique des véhicules, soit environ 20 % de la consommation actuelle d'électricité;
- n'utiliser que des énergies primaires sans carbone (nucléaire, hydraulique, éolien, biomasse, solaire photovoltaïque), ce qui implique des capacités de stockage appropriées pour gérer les pointes de demande.

Cette condition sera plus ou moins longue et difficile à remplir, mais elle n'empêche pas le secteur des transports d'engager sans attendre sa transition énergétique en utilisant provisoirement un mix électrique (européen) produit en partie par de l'énergie fossile (charbon ou gaz).

Un éventail de technologies décarbonées adaptables à long terme aux différents modes de transport peut être identifié à cet effet.

On peut imaginer un scénario d'organisation de long terme des transports intérieurs en France, dans laquelle, pour schématiser, on utiliserait :

- pour les déplacements de proximité : des véhicules tout électriques avec batteries (véhicules légers, véhicules utilitaires légers et autobus), ce qui ne pose pas de problèmes techniques, mais des délais d'adaptation économique (pour la production) et territoriale (pour les équipements de recharge);

- pour les déplacements à longue distance : des équipements de recharge rapide pour les voitures électriques (une transition économique et sociale plus longue à gérer) ; et, pour les camions, des carburants issus de la biomasse et des autoroutes électrifiées en équipant de caténaires les axes majeurs de transit poids lourds, combinées à des motorisations hydrogène à développer dès que les coûts de production le permettront.

Sous réserve des étapes transitoires (liées aux conditions économiques et adaptations sociales jugées nécessaires), ce scénario de long terme permettrait :

- de se passer d'une étape « Véhicule 2 l/100 km » qui n'apparaît plus nécessaire dans la trajectoire de progression des véhicules tout électriques (progrès des batteries en performances et en coût), et qui conduit à accélérer la transition industrielle vers la voiture tout électrique ;
- de n'investir que sélectivement dans les filières gaz, dans la mesure où les biogaz de synthèse ne couvriraient qu'une faible partie des besoins énergétiques des transports et devraient être affectés à des usages spécifiques, tels que les avions, ou, provisoirement, les camions...

POUR CONCLURE : DES QUESTIONS DÉRANGEANTES POUR LES ACTEURS DE LA CHAÎNE ÉNERGIE-TRANSPORT

Trouver un consensus sur la perspective de long terme de transport décarboné décrite ci-dessus va soulever des questions dérangelantes, dans la mesure où ce scénario :

- rapproche la date de fin de commercialisation des véhicules à moteur thermique, annoncée pour 2040 par les autorités publiques françaises (et chinoises), ce qui pose aux constructeurs automobiles des problèmes lourds d'adaptation de leurs capacités de production déjà excédentaires à l'échelle mondiale ;
- limite la place de la filière biocarburants pour le transport, filière qui était jusqu'à présent bien placée parmi les investissements jugés efficaces pour limiter les émissions de gaz à effet de serre ;

- pose dès à présent la question des besoins supplémentaires massifs de production d'énergie électrique pour remplacer les 50 Mtep consommés aujourd'hui par les transports ;
- oblige en conséquence à prévoir dès à présent les besoins de stockage de l'énergie électrique liés au développement massif des ENR intermittentes (éolien et solaire), qui semblent incontournables à l'échelle du marché européen de l'énergie électrique (même si la France fait durer plus longtemps son parc de centrales nucléaires en assumant les risques correspondants) ;
- nécessite enfin d'investir plus intensément dans les filières hydrogène pour la motorisation des poids lourds, ce qui servirait principalement au stockage temporaire de la production d'énergie électrique intermittente.

Annexe 4 : Bâtiment et génie civil

A. BÂTIMENTS

Le parc de bâtiments construit comprend principalement le parc résidentiel (logements) et le parc tertiaire (bureaux).

Le parc résidentiel comprend en 2015 35 millions de logements (tableau 2), dont 29 millions environ de résidences principales. Ce parc croît lentement, de l'ordre de 1,1 % par an depuis 2005.

Le nombre de logements neufs construits en 2015 est de 351 000 pour la France entière dont 337 000 pour la France métropolitaine. Ces chiffres incluent le renouvellement du parc résidentiel dont le taux reste inférieur à 1 % par an et les constructions neuves.

Le parc tertiaire représente 850 millions de m², dont 480 millions pour le secteur privé et 370 millions de m² pour le parc public (écoles, mairie...). L'État à lui seul représente 120 millions de m². Il est occupé à plus de 90 % par des PME ou TPE. Le taux de renouvellement est de l'ordre de 1 % en France. Il atteint 3 % en Île-de-France.

Tableau 2 | Parc de logements individuels et collectifs en France (en milliers). Sources : INSEE, S0eS, estimation annuelle du parc de logements.

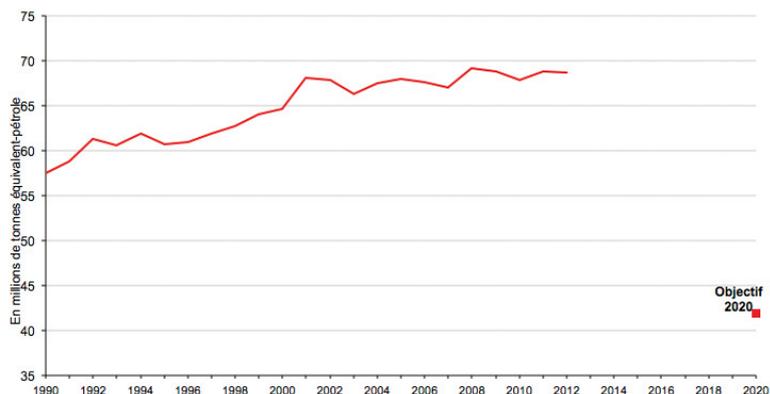
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Individuel	17763	18008	18248	18466	18660	18844	19038	19229	19415	19588	19763
Collectif	13625	13768	13933	14104	14283	14462	14625	14809	14989	15161	15334
Total	31388	31776	32181	32570	32943	33306	33663	34038	34404	34749	35097

Consommation d'énergie du parc construit résidentiel et tertiaire

Le parc résidentiel représente 40 % de l'énergie primaire ou 30 % de l'énergie finale consommée. Il est le premier secteur consommateur d'énergie avec celui des transports. Plus de la moitié du parc (53,6 %) consomme entre 151 et 330 kWhep/m²/an; seulement 14 % consomment moins; les 32 % restants correspondent à des bâtiments dont la consommation est égale ou supérieure à 330 kWhep/m²/an (passoire thermique). La date de construction du logement, sa taille, son mode de chauffage et sa localisation géographique sont autant de facteurs qui influent la consommation d'énergie. Ainsi, les studios et deux-pièces sont les plus énergivores. La performance technique des maisons individuelles est meilleure que celle des appartements.

Le parc tertiaire consomme à lui seul 15 % de l'énergie primaire. En incluant les bureaux, centres commerciaux, établissements sanitaires et d'enseignements, la consommation atteint 400 kWhep/m²/an.

La consommation des secteurs résidentiel et tertiaire a crû rapidement au cours de la période 1990-2010 et s'est stabilisée depuis. On est loin cependant de l'objectif initial de 2020 – 40 % fixés avant la COP21 (voir figure 3).



Source : Bilan énergétique de la France pour 2012, SOeS.

Note : Consommation d'énergie corrigée des variations climatiques.

Figure 3 | Consommation d'énergie des secteurs résidentiel et tertiaire.

Émissions de GES dues au parc construit résidentiel et tertiaire

En France, l'utilisation de l'énergie est la principale source d'émission de GES (71 %). Le secteur du résidentiel et tertiaire n'échappe pas à ce constat, mais n'intervient que pour 11 % derrière l'industrie manufacturière (13 %) et la construction et les transports (27 %). Ce rang moindre par rapport à la consommation d'énergie s'explique en majeure partie par le fait que 31 % des logements utilisent l'énergie électrique pour le chauffage, énergie qui repose en France, en partie sur l'énergie nucléaire.

Les émissions de GES ont légèrement décliné depuis 1990 pour le résidentiel et pour le tertiaire (tableau 3). Elles sont très influencées par les conditions climatiques d'une année à l'autre.

Tableau 3 | Émissions GES en Mt d'équivalent CO₂, source Citepa avril 2015 (version Plan climat page 217, voir note 1).

	1990	2000	2005	2010	2011	2012	2013
Résidentiel	60,1	61,7	68,2	63,9	52,7	57,9	58,9
Tertiaire	28,7	30,3	32,1	29,3	26,9	25,8	27,9
	88,8	92	100,3	93,2	79,6	83,7	86,8

Il est à noter que les villes sont les principaux contributeurs aux émissions de gaz à effet de serre sur le territoire : en tant que cadre bâti dense, elles sont à l'origine de 60 % des émissions de dioxyde de carbone, du fait de la production d'énergie (chauffage), du trafic de véhicules et de l'industrie.

Il convient d'ajouter aux chiffres précédents les émissions dues à l'extraction des matériaux (sable, argile, gypse, minerais de fer, etc.) et à la fabrication des produits de construction (ciment et clinker, acier, plastiques, etc.).

La réduction des émissions de GES est visée à l'article 6-4 du *Paris Agreement* de la COP21.

L'objectif de l'Europe dans le cadre de la COP21 est de réduire de 40 % les émissions de GES à l'horizon 2030 par rapport à 1990, ce qui est très ambitieux compte tenu de la tendance observée à ce jour.

Lutte contre les émissions de GES dans le résidentiel et tertiaire

La lutte contre les émissions de GES passe en premier lieu par la réduction des consommations énergétiques, mais aussi par la fabrication de matériaux moins énergivore et moins émettrice de GES.

Réduction de la consommation énergétique des bâtiments

La part du chauffage et de la production d'ECS (eau chaude sanitaire) utilisant l'énergie électrique (soit 31 %) est peu émettrice de GES, car 75 % de cette énergie provient des centrales nucléaires. Il est

peu probable que cette part augmente : l'accroissement très fort de la pointe dû au chauffage électrique s'est arrêté vers 2010 (figure 3), probablement du fait de l'arrivée des nouvelles normes de construction (BBC et RT 2012).

Pour autant, le chauffage électrique et la production d'ECS nécessitent d'isoler au mieux les bâtiments, comme l'ont montré les études d'EDF compte tenu en particulier du coût du kWh électrique.

Les bâtiments neufs répondent aux critères d'isolation de la RT 2012 (bâtiments HQE) ou sont même à énergie positive. Mais comme rappelé ci-dessus, le taux de constructions neuves reste très faible (1 % du parc par an).

Conformément aux orientations actuelles, l'effort doit donc porter sur la réhabilitation thermique du parc résidentiel et tertiaire. Cette réhabilitation progresse lentement compte tenu des problèmes techniques, financiers et socioculturels à résoudre. Le retour d'investissement ne se situe qu'à partir de 10 ans (isolation de fenêtres, systèmes de chauffage) voire 20 ans (ravalement thermique), ce qui n'est pas toujours accepté par les propriétaires et compatible avec la rotation des propriétaires de logement (5 à 10 ans).

La détection des besoins repose sur le diagnostic de performance énergétique (DPE). Aujourd'hui très décrié, ce diagnostic devrait recourir à une méthode de calcul standardisée complète – par exemple basée sur le recours à des logiciels éprouvés comme ceux du CSTB, en prévoyant une aide financière pour les ménages en situation de précarité.

Les actions de réhabilitation thermique dans le bâtiment devraient concerner les gisements prioritaires. Nous suggérons de limiter dans un premier temps les résidences principales en traitant les logements les plus énergivores dont le nombre est estimé à environ 4 millions et en réservant des actions plus ciblées pour les logements ayant une efficacité énergétique moyenne, estimés à environ 17 millions.

La réhabilitation thermique pourrait être accélérée en préindustrialisant les rénovations, notamment l'isolation thermique, par exemple en faisant appel à la méthodologie *EnergieSprong*¹⁶ développée aux Pays-Bas et encouragée par la Commission européenne.

Malgré tout, il est peu probable que la réduction de 40 % d'émission de GES annoncée par l'Europe dans le cadre de la COP21 soit respectée à l'horizon de 2030.

Une solution de transition consiste à recourir pour le chauffage et l'ECS :

- à des énergies fossiles moins polluantes et moins émettrices de GES et à meilleur rendement telles que le gaz dont le facteur d'émission GES est 2,1, comparé à celui du pétrole 3,1 et du charbon 4 ;
- à des énergies mixtes (électricité et gaz) combinées avec des réseaux de chaleur à la biomasse ou à la géothermie ;
- aux énergies éoliennes et photovoltaïques en développant l'autoconsommation sans attendre le développement de moyens de stockage ;
- au chauffe-eau solaire pour l'ECS, relativement répandu, ou encore le chauffage solaire thermique peu utilisé en France par manque de sociétés spécialisées assurant à la fois l'installation et sa maintenance.

Matériaux de construction et émission de GES

En sus des économies d'énergies et d'émission des GES liées au fonctionnement des bâtiments, l'attention doit être portée aussi sur l'utilisation de matériaux permettant de limiter la consommation d'énergie et l'émission de GES au niveau de leur extraction, leur

16. <http://www.lemoniteur.fr/article/renovation-energetique-adapter-le-modele-hollandais-energiesprong-au-territoire-francais-32391691>

fabrication, leur transport – s’agissant de matériaux en général pondéreux – et leur élimination ou leur recyclage¹⁷.

Parmi les matériaux susceptibles d’apporter une réduction des GES pour la construction des bâtiments, on peut distinguer :

- les matériaux courants recyclés, valorisant les déchets de démolition ou autres; par exemple, bois de charpente, lambris, brique, pierre d’appareillage, carrelage, etc. ;
- les matériaux de substitution; par exemple l’argile dont les procédés de synthèse modernes ont l’avantage d’être peu énergivores, avec une faible émanation de GES ;
- les matériaux « biosourcés »¹⁸, c’est-à-dire l’ensemble des matériaux et produits dont une partie des matières premières est issue du monde du vivant (biomasse végétale et animale) incluant les matières recyclées, fibres de bois comprises, mais hors « bois d’œuvre » selon la définition du CSTB; ces matériaux sont : chanvre, lin, ouate de cellulose, fibres de bois, paille, liège, fibres de coton recyclées, plume de canard, laine de mouton et roseaux; par exemple, isolants thermiques fabriqués à partir du recyclage de matelas et literie (le biosourcé représente 8 % du marché de l’isolation des bâtiments) ;
- le bois d’œuvre utilisable non seulement pour la construction de maisons individuelles, mais aussi d’immeubles.

17. Les émissions de GES des matériaux de construction ou autres produits sont à examiner selon deux approches :

- L’approche territoire, qui est celle du protocole de Kyoto, permet de comptabiliser les émissions de GES là où elles sont émises;
- L’approche empreinte permet de comptabiliser les émissions dues à la demande finale intérieure, en ajoutant les émissions liées aux produits importés et en retranchant celles des produits fabriqués sur le territoire français puis exportés.

En 2010, selon l’approche territoire, la France a émis 486 millions de tonnes d’équivalent CO₂ de GES (CO₂, CH₄ et N₂O), soit 7,7 tonnes par habitant. Ces émissions sont en baisse de 19 % par rapport à 1990. En revanche, selon l’approche empreinte, ces émissions sont de 733 Mt d’équivalent CO₂ en 2010, soit, rapportées à la population, autant qu’en 1990 : 11,6 tonnes par habitant.

18. label matériaux biosourcés <http://www.certivea.fr/certifications/label-batiment-biosource>



Immeuble en bois BBC
à Issy-les-Moulineaux



École bois et paille à Montreuil

Ces matériaux nécessitent de structurer et industrialiser les filières correspondantes et d'organiser l'innovation en s'appuyant sur les connaissances scientifiques issues de la R et D. Ces filières ne se mettent que très progressivement en place.

B. ADAPTATION DE L'HABITAT, DE LA VILLE ET DES INFRASTRUCTURES AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les projections climatiques prévoient à la fois une augmentation de la température en France métropolitaine, une hausse du niveau de la mer et une augmentation de la fréquence et de l'intensité d'événements extrêmes (pluies intenses, vagues de chaleur...). Autant de phénomènes qui pourront avoir des impacts sur les territoires, cadres bâtis, villes et infrastructures. Les modifications structurelles liées à la prise en compte des risques qui en résultent et les mesures à prendre pour en atténuer les conséquences sont soumises à une forte inertie qui oblige à raisonner, tout comme pour le changement climatique, à l'échelle du siècle.

Adaptation de l'habitat au changement climatique

Le réchauffement climatique, 2 à 3 °C d'ici 2100, aura des répercussions sur le confort intérieur des logements et bureaux. Or, la réglementation actuelle RT 2012 et celle à suivre mettent l'accent principalement sur la limitation des déperditions thermiques des bâtiments. À terme, elle devra prendre aussi en compte le besoin de limiter la température intérieure des pièces, et d'évacuer des calories vers l'extérieur (climatisation source de dépense d'énergie). Dans cet ordre d'idée, la géothermie de faible profondeur qui peut fonctionner en été comme climatiseur et en hiver comme chauffage, représente une solution ne dégageant pas de gaz à effet de serre tout en restant d'un coût accessible pour l'habitat individuel.

Pour atténuer les conséquences du dérèglement climatique, il convient aussi de construire des maisons et immeubles moins vulnérables à la violence des phénomènes météorologiques en respectant, ce qui n'est pas toujours le cas, au moins les normes actuelles; par exemple, résistance au vent des toitures vis-à-vis des tempêtes et cyclones ou fondations de maisons individuelles sur sols argileux suffisantes pour résister aux épisodes de sécheresse devenus plus nombreux.

Adaptation de la ville au changement climatique

La ville est un système complexe particulièrement concerné par le changement climatique. Ses bâtiments consomment de l'énergie et rejettent des gaz à effet de serre; son climat local est accentué par la formation d'îlots de chaleur urbains; ainsi, la température de Paris intramuros est supérieure de plusieurs degrés à celle des zones rurales périphériques en cas de canicule.

Aussi faut-il non seulement réduire les causes anthropiques du changement climatique, mais aussi se prémunir contre ses effets.

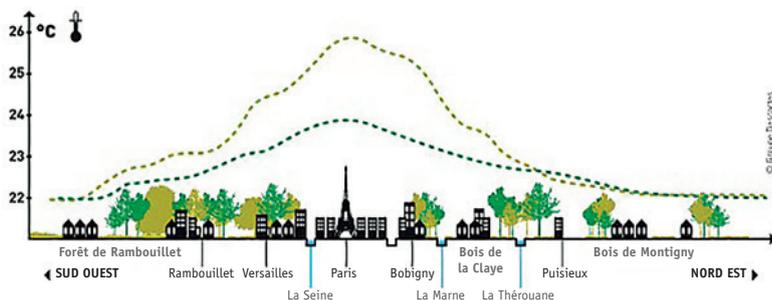
Pour atténuer les conséquences du changement climatique, deux orientations complémentaires sont préconisées aujourd'hui :

1. prévenir les risques, entre autres :

- identifier les zones particulièrement vulnérables (zones inondables, zones côtières exposées aux tempêtes, zones de montagne exposées aux glissements de terrain, couloirs d'écoulements torrentiels...) et en tenir compte au niveau des documents d'urbanisme,
- construire ou renforcer les équipements susceptibles de mieux se prémunir contre les risques météorologiques (systèmes d'alerte) et de protéger les habitants (digues, dérivation des eaux torrentielles, durcissement des équipements publics tels que réseaux électriques, casernes de pompiers, hôpitaux...),
- adopter des modèles de gestion rapidement opérationnels en cas de survenance de phénomènes extrêmes (pluies orageuses, tempêtes, vagues de chaleur...);

2. expérimenter des solutions pour atténuer les conséquences du réchauffement climatique :

- végétaliser la ville (plantations) et ses constructions (toitures et murs végétalisés...),
- restreindre les surfaces et matériaux absorbant la chaleur (surfaces bitumineuses de chaussées et parking) et préférer les matériaux à fort albédo et pouvoir de réflexion (blanchissement des surfaces de toitures ou de voies publiques, parkings, rues, etc.),
- adopter des formes urbaines limitant les îlots de chaleur, les couloirs éoliens ou les couloirs d'écoulement de pluies torrentielles (orientation des voiries),
- faire appel à l'architecture bioclimatique.



Résultats du Grand Paris (groupe Descartes – projet EPICEA). La courbe vert clair représente la température pour l'agglomération parisienne actuelle. La courbe vert foncé représente la température atteinte après la reforestation (+ 30 % de forêts) en Île-de-France et le développement de l'agriculture maraîchère périurbaine.

Adaptation des infrastructures au changement climatique

Les infrastructures peuvent aussi être victimes du changement climatique : elles doivent donc être adaptées.

Par exemple, les risques d'affouillement des fondations de certains ouvrages d'art routiers ou ferroviaires seront accrus, suite à des crues plus fréquentes et plus intenses.

Les chaleurs plus fréquentes et plus intenses, les hivers plus doux et plus humides, les cycles de gel/dégel plus cadencés : autant d'effets du changement climatique qui peuvent dessécher le sous-sol des routes, déformer leur surface, faire vieillir précocement les chaussées et provoquer des infiltrations d'eau, déstabiliser les talus. Un programme (CCLEAR) d'un l'institut de recherche, l'IFSTTAR, est consacré à l'étude de ces effets.

Dans le domaine des techniques routières, plusieurs innovations ont pour objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre à la fois lors de la construction et pendant l'exploitation. Les progrès dans le domaine des matériaux permettent de concevoir des surfaces routières à longue durée de vie, autonettoyantes, auto-cicatrisantes, recyclées, bio-sourcées, thermochromes.

Par exemple, dans le cas du projet de la route solaire hybride développé par l'IFSTTAR et un centre d'ingénierie, le CEREMA, la couche

de roulement de la chaussée est formée d'un enrobé semi-transparent. Des capteurs solaires, placés sous cette couche, produisent de l'énergie électrique utilisée pour chauffer et faire circuler de l'eau, assurant ainsi la viabilité hivernale, mais aussi, en fonctionnement inversé, la viabilité estivale dans les îlots de chaleur urbains.

Il existe également des éco-comparateurs qui sont destinés à l'analyse du cycle de vie des chaussées (extraction des matériaux, fabrication, transport, mise en œuvre) et fournissent en particulier une estimation des émissions de gaz à effet de serre et de la consommation d'énergie et d'eau.

BIBLIOGRAPHIE

Chiffres clés du climat en France, Édition 2015, Commissariat général au développement durable, service de l'observation et de statistiques (SOeS) – www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr, www.cdclimat.com/recherche.

Inventaire des émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre en France, avril 2015, CITEPA, MEDDE.

Le parc de logements en France métropolitaine en 2012, chiffres et statistiques, no 534, juillet 2014, Commissariat général au développement durable, Bilan énergétique de la France pour 2012, SOeS.

La rénovation énergétique des bâtiments, avril 2013, Conseil économique pour le développement durable.

Les matériaux de construction biosourcés : enjeux et stratégie, novembre 2013, MEDDE et ministère du Logement.

IFPEN, site <http://www.ifpenergiesnouvelles.fr/Espace-Decouverte/Les-grands-debats/Quel-avenir-pour-les-biocarburants>

Projet EPICEA, étude pluridisciplinaire des impacts du changement climatique à l'échelle de l'agglomération parisienne, octobre 2012, Météo France, CSTB et Mairie de Paris (APUR).

Annexe 5 : Industrie manufacturière

Les émissions de CO₂ dues à la combustion d'énergie de l'industrie, hors production d'énergie, ont baissé de plus de 40 % entre 1990 et 2015, passant de 23 % à 16,5 % des émissions totales, loin derrière les transports et le résidentiel et tertiaire¹⁹. La baisse est continue, à un rythme actuel de l'ordre de 3-4 % par an. Cette baisse n'est due que très partiellement à l'amélioration de l'efficacité énergétique de l'industrie qui se poursuit cependant depuis les crises pétrolières des années 1970.

Un facteur essentiel est la baisse de la production industrielle en France comme dans la plupart des pays européens. Cette baisse correspondant en partie à la crise de 2008, mais surtout et de manière permanente, aux délocalisations. Du point de vue des émissions de GES, cette baisse est donc compensée par l'augmentation des émissions dans les nouveaux pays producteurs.

Les quatre principaux secteurs émetteurs de CO₂ de l'industrie manufacturière sont la sidérurgie, la chimie, l'industrie cimentière et l'industrie du verre.

19. Bilan énergétique de la France, Commissariat général au développement durable, juillet 2015, p. 99.

Pour la sidérurgie, la baisse des émissions a été due à une baisse de 17 % de la production d'acier, mais aussi à une baisse de 26 % des émissions de CO₂ par tonne d'acier produit, ce qui correspond à l'arrêt de la production des hauts fourneaux et donc à une part croissante des fours électriques, qui émettent 3 fois moins de CO₂ que l'acier « neuf » (c'est-à-dire produit à partir de minerai). Comme indiqué plus haut, il s'agit donc d'un déplacement géographique des émissions de GES et non d'une réduction.

La chimie est restée beaucoup plus stable avec des émissions qui n'ont baissé que de 4 % depuis 1990. Il en a été de même pour l'industrie agroalimentaire.

Pour l'industrie du verre, la production reste à peu près constante (+4 % entre 1990 et 2011), mais les émissions de CO₂ ont été réduites de 27 % à la tonne de verre produit. Ceci est dû en grande partie au recyclage du verre et au remplacement du fioul par du gaz ou de l'électricité pour les fours verriers.

Les émissions de CO₂ de l'industrie cimentière sont essentiellement dues à la production de clinker. Les émissions unitaires sont à peu près stables depuis 1990 et varient essentiellement en fonction des combustibles utilisés. Le volume des émissions dépend donc essentiellement du volume de production et donc de l'activité des secteurs du bâtiment et des travaux publics, d'où une baisse sensible depuis la crise de 2008.

Au total, les émissions des industries manufacturières devraient suivre l'évolution des productions, contrairement à la situation des transports et du résidentiel et tertiaire pour lesquels l'évolution des investissements et des technologies peut réduire considérablement les émissions de GES. La réduction des productions en France et en Europe pourra résulter de la poursuite des délocalisations, ce qui ne paraît pas souhaitable, mais aussi d'une augmentation de la durée de vie des produits manufacturés en privilégiant la réparation par rapport à l'achat de produits neufs en majorité importés.

Annexe 6 : Production d'énergie

1. L'OFFRE

L'énergie est responsable d'environ 75 % des émissions de GES dans le monde, essentiellement liées aux énergies fossiles; ces dernières représentent plus de 80 % des énergies primaires. Selon l'AIE, dans son scénario central de 2014, ces mêmes énergies augmenteraient de 37 % en volume d'ici 2040 et leur part serait encore de 75 % dans le mix énergétique mondial. Le nucléaire n'interviendrait que pour 6 % et les énergies renouvelables que pour 19 %. Pour atteindre l'objectif de 2 °C – élévation de la température moyenne liée aux émissions anthropogéniques –, le GIEC estime que la part des énergies fossiles devrait atteindre 50 % en 2040; ces deux perspectives semblent inconciliables. C'est pourquoi l'AIE a étudié un scénario plus offensif, BRIDGE, basé sur un développement plus rapide des technologies éprouvées.

2. LES ÉNERGIES FOSSILES : CHARBON, PÉTROLE, GAZ

La perspective d'un épuisement rapide des ressources énergétiques fossiles – y compris pour le nucléaire – ne fait plus partie des

préoccupations, non seulement parce que le monde s'est engagé à en réduire l'usage, mais parce que la technologie a permis d'en éloigner considérablement l'échéance. L'excès de production actuel a même affecté les prix, avec des conséquences importantes sur l'emploi et la situation des producteurs; ces très bas prix risquent de ralentir les efforts de réduction concernant leur emploi.

Le charbon intervient pour 45 % dans les émissions de CO₂ émises par les énergies fossiles, contre 35 % pour le pétrole et 20 % pour le gaz. C'est donc sur le charbon qu'il faudrait concentrer les efforts en priorité.

Le charbon

Le charbon a pour principal usage la production électrique (70 %) et l'industrie (19 %). Il assure 40 % de la production mondiale. Cette concentration des usages pourrait être un atout : la CSC – capture et stockage du CO₂ – est l'une des technologies envisagées pour éviter l'envoi du CO₂ dans l'atmosphère; le fait de disposer de sources abondantes en faciliterait l'économie, mais malgré des progrès possibles ou en cours, son utilisation à grande échelle semble encore lointaine : sites possibles, acceptabilité, économie, sont les freins principaux; elle serait largement insuffisante à elle seule.

Contrairement à certaines prévisions, la production et la consommation commencent à stagner, en remplacement de hausses prévues. Le grand pays producteur est la Chine – 50 % de la production mondiale –, suivie d'assez loin des États-Unis, et de l'Inde. Ce sont aussi les pays consommateurs; la consommation en Chine a stagné en 2015, elle a diminué aux États-Unis, mais continue d'augmenter en Inde, aux Philippines et dans d'autres pays. L'Europe n'en produit que 4 %; la Pologne, l'Allemagne et la Grande-Bretagne en sont les principaux producteurs et consommateurs, mais sont en baisse très légère, sauf la Grande-Bretagne en diminution sensible. La France n'est plus productrice et est une très faible consommatrice.

Les « experts » semblent désorientés : certains estiment que le pic de consommation a été atteint en 2015, et d'autres qu'elle va continuer à augmenter, plus lentement, de 10 % d'ici 2040 pour l'AIE, version 2015. Ce qui est plus sûr, c'est que sa part dans la production électrique baisse, remplacée dans certains pays par le gaz (États-Unis, Grande-Bretagne) ou les productions éoliennes et solaires. Le meilleur rendement des centrales électriques récentes, dites « supercritiques » a permis de diminuer les émissions de GES, à production égale, mais l'emploi de charbon de moins en moins riche compense un peu ce progrès.

Orientées sur la production électrique, la sobriété et l'efficacité énergétique agiront peu sur le charbon. Par contre, une taxe carbone élevée permettrait dans un premier temps son remplacement par le gaz, ou par les nouvelles productions électriques « propres », dont le nucléaire : en Chine ou en Grande-Bretagne par exemple.

Le pétrole

Le pétrole a deux atouts majeurs : il est liquide, il a la meilleure densité énergétique. Il est donc idéal pour les transports, mais il est utilisé aussi pour le chauffage, l'industrie dont la pétrochimie, l'électricité (moins de 5 % dans le monde), l'agriculture. Son raffinage extrait aussi des produits spéciaux, comme les huiles, les bitumes, les gaz liquéfiés, etc.

En France, les transports interviennent pour 70 % pour sa consommation et plus de 95 % des besoins, le résidentiel pour 17 % et 19 % des besoins, 8 % pour l'industrie, dont la pétrochimie, et 5 % pour l'agriculture. Ces différents usages, très diffus, ne sont pas propices à la récupération des émissions de GES.

Le pétrole a subi de nombreux cycles. La demande mondiale n'a pratiquement jamais baissé d'une année sur l'autre. Il en est de même aujourd'hui. Trois pays se disputent le leadership de la production : les États-Unis, l'Arabie saoudite et la Russie avec environ 10 % chacun de la production mondiale. Par contre, les États-Unis sont de

très loin les plus gros consommateurs, environ 20 % de la production mondiale, qui devrait baisser à 16 % en 2040, devant la Chine, 11 % et très loin le Japon, l'Inde, le Brésil, etc. L'Europe est un producteur très faible et en diminution – en Norvège et Grande-Bretagne.

L'AIE (réf. février 2016) estime que la production continuera sa hausse dans les années à venir : 101 millions bbl/j en 2021 au lieu de 94 en 2015, l'augmentation venant surtout des huiles de schiste et des « condensats » accompagnant la production du gaz. Sur le plus long terme, l'AIE avait prévu en 2015 que cette production ne serait atteinte qu'en 2040 – scénario « *new policy* » ! Serait-ce alors le pic de la demande ? La réduction des émissions de CO₂ issues du pétrole ne serait pas immédiate et devrait attendre la pénétration massive de l'électricité ou d'autres carburants propres : biogaz, hydrogène, bio-carburants très propres... ! Sobriété et efficacité énergétiques, hybridation continueront en attendant... ? Une taxe carbone ne devrait pas avoir d'effet notoire immédiat sur le transport, mais beaucoup plus sur les usages chaleur dans le tertiaire, au moins dans le cas de la France.

Le gaz

Le gaz est la plus propre des énergies fossiles. C'est pourquoi les producteurs comptent beaucoup sur lui pour déplacer le charbon dans sa fonction de production électrique ; 41 % de la production de gaz dans le monde est consacrée à la production électrique dans le monde. Mais ses usages sont plus diversifiés que le charbon ou le pétrole ; ainsi, en France, le résidentiel intervient pour 57 %, l'industrie pour 26 %, l'énergie pour 11 %, et très peu pour le transport. Dans ce dernier domaine, le gaz peut intervenir davantage ; il commence à le faire dans le maritime.

Sur le développement futur, les experts ont là aussi des avis différenciés. La baisse de la demande en Europe est compensée par la hausse de la consommation dans les pays asiatiques. L'AIE estime que sa part dans le mix énergétique mondial passera de 21 % en

2014 à 24 % en 2040, alors que pétrole et charbon reculeraient respectivement à 26 % (ex 31 %) et 24 % (ex 29 %). Son atout essentiel pourrait être son prix très compétitif permis par l'extraction des gaz de schiste aux États-Unis et dans d'autres pays, appuyé par une taxe carbone suffisante et une production surabondante. Outre son contenu carbone plus faible, les centrales à gaz à cycle combiné ont un rendement élevé.

3. LES BIOÉNERGIES DE REMPLACEMENT

Le bois

Il est encore une énergie importante – de l'ordre de 10 % – et de loin la plus importante des énergies renouvelables. Le bois énergie ne doit pas concurrencer le bois d'œuvre ou le bois industriel, mais n'utiliser que tous les déchets issus de l'exploitation ou de l'entretien des forêts ou de fin de vie. Il existe un potentiel important dans le monde, tenant compte de la non-déforestation, y compris en Europe et surtout en France. Il conduit à la chaleur, à l'électricité – cogénération – voire au gaz. L'Allemagne produisait autant d'électricité en 2014 à partir du bois que celle produite par l'éolien. La France, nettement plus forestière, exploite très peu son potentiel et ne prévoit pas de forts développements. Les technologies sont matures.

Les biocarburants

Ils ont suscité de grands espoirs, à l'exemple brésilien, voire américain, pour l'éthanol. Mais ce qui se passe quelque part, bon à savoir, n'est pas souvent transposable ailleurs. Ainsi, la première génération en Europe s'est révélée peu performante en matière de réduction des émissions – de 50 à 70 % par rapport aux fossiles, mais sans tenir compte du changement d'affectation des sols, qui dégrade fortement ses performances –, et moins économique. La deuxième génération va voir le jour industriellement d'ici 2020, mais son succès n'est pas

assuré. La troisième est encore dans les laboratoires de recherche, voire en développement dans certains pays.

Les biogaz

Ils ont déjà une importance dans de nombreux pays, notamment européens ; la fermentation des déchets organiques conduit au méthane qui peut être, après purification, envoyé au réseau, pour la production électrique ou utilisé comme carburant. Pour la France, un objectif de 10 % des besoins gaz issus du biogaz est visé pour 2030 et ce pourcentage devrait progresser fortement au-delà. Un développement relatif fort est prévu d'ici 2023, mais il part de très bas.

Les pompes à chaleur

Elles sont rarement évoquées. Pour la France, elles produisent pourtant aujourd'hui autant d'énergie équivalente que l'éolien. L'État ne prévoit qu'un développement limité de l'ordre de 5 %/an. La ressource est illimitée, que les calories viennent de l'eau – y compris des eaux de rejets –, du sol ou de l'air.

4. LES AUTRES ÉNERGIES ET L'ÉLECTRICITÉ

L'électricité

Une « fée » n'existe que dans les romans pour enfants ; pourtant elle est presque la seule à attirer l'attention des médias, des politiques et des lobbies à travers l'éolien et le solaire. Pourtant, elle ne représente aujourd'hui que moins de 20 % des énergies consommées dans le monde et ne dépasserait les 30 % que dans une vingtaine d'années. Les 2/3 sont produits par les fossiles, l'hydraulique et le nucléaire se partagent l'essentiel du reste ; biomasse, éolien et solaire n'en représentaient que 3 % en 2013.

Le nucléaire

Il pourrait progresser au même rythme que la consommation d'ici 2035, après une baisse liée à l'accident de Fukushima; certains pays pensent qu'il est un élément indispensable à la préservation du climat. La génération 4, très peu gourmande en matière première et nettement moins émissive de déchets radioactifs est en développement en vraie grandeur dans certains pays. Quant à la fusion, beaucoup plus lointaine, elle est le sujet du projet ITER, mais aussi d'autres études concurrentes.

L'hydraulique

Elle représente de l'ordre de 75 % des énergies renouvelables pour la production électrique dans le monde. Il existe encore un potentiel important, de plus en plus difficile à mettre en œuvre : géopolitique, financement, acceptabilité. En France, un potentiel de 16 % a été identifié, à l'occasion des renouvellements de concessions ou de « modernisation »; des développements de second ordre existent dans le petit hydraulique de courants, et dans les énergies marines : l'« hydrolienne » avec les courants marins, ou bien l'énergie thermique des mers, nommée « ETM », en expérimentation. Les STEP – station de transfert d'énergie par pompage – sont essentiellement de l'hydraulique.

Les énergies renouvelables (EnR) électriques

Biomasse, éolien et solaire représentent les 25 % restants, dont l'éolien pour environ 15 %. La part de la totalité des renouvelables était de 22 % en 2013 pour le monde et devrait passer à 26 % en 2020; ce qui donne à l'éolien dans le monde une part de production de 3 % environ et de 1 % pour le solaire, assez analogue à la situation en France : sur la période juillet 2014, juillet 2015, l'hydraulique a produit 13 % de l'électricité, l'**éolien** 3,7 %, le **solaire** 1,4 %, et la **biomasse** 1,2 %, source RTE. La France est moins développée dans ces trois dernières énergies par rapport à certains pays européens,

dont l'Allemagne. La France prévoit pour 2023 le doublement de l'éolien et le triplement du photovoltaïque par rapport à 2015 (source Gouv.) dans le cadre de la COP21. L'objectif de 30 % d'électricité intermittente – éolien et solaire – est donc encore lointain, d'autant plus que l'acceptabilité devient un frein de plus en plus fort, tant pour des raisons environnementales que pour l'augmentation des prix qu'elle entraîne. De plus, l'intermittence entraîne des coûts extérieurs considérables (réseaux, marchés de capacité, stockages) à la charge des consommateurs. Enfin, du fait de leur taux de charge faible, la capacité installée est de 5 à 8 fois plus importante que la production attendue ; le marché de capacité ajoute à ces surcapacités ; le tout crée un prix de gros sur le marché européen très bas, interdisant tout investissement non subventionné, quel que soit le coût à la production. La France est aussi victime des surcapacités allemandes, très carbonées. Ce problème n'est pas spécifique à l'Europe.

Il y a de nombreuses solutions techniques : les progrès sont continus sur les batteries pour le stockage de l'électricité et donc aussi pour la mobilité, l'électricité surabondante peut permettre de fabriquer de l'hydrogène par électrolyse, les réseaux « intelligents » et la domotique peuvent gérer plus efficacement l'offre et la demande. Tout cela prendra du temps, des moyens techniques et financiers, des accords inter pays, avant qu'Hélios ne soit le maître de l'offre des énergies dans le monde.

Annexe 7 : Agriculture, forêt et biomasse

L'AGRICULTURE

Les émissions françaises de gaz à effet de serre de l'agriculture représentent environ 80 millions de tonnes d'équivalent CO₂, soit 16 % des émissions totales, dont 47 % correspondent à l'utilisation des engrais, 42 % à la fermentation entérique des animaux d'élevage et 11 % à la gestion des déjections animales. Ces émissions tendent à baisser à un rythme de 0,6 % par an depuis 2000. En contrepartie, l'utilisation des terres, leur changement et la forêt correspondent globalement à une séquestration du CO₂ pour un total qui varie selon les années autour de 40 millions de tonnes de CO₂. Ceci est principalement dû au rôle de la forêt. Ces séquestrations ont tendance à augmenter principalement du fait de l'augmentation des surfaces boisées.

Un rapport de l'INRA publié en 2013 établit une liste des actions possibles pour réduire les émissions de GES de l'agriculture :

- diminuer le recours aux engrais minéraux de synthèse, par une meilleure technicité de leur emploi ;

- accroître la part des légumineuses (haricots, pois, lentilles...) dans les cultures, car les légumineuses fixent l'azote atmosphérique et ne nécessitent donc pas l'apport de fertilisants externes;
- développer les techniques culturales sans labour permettant un meilleur stockage de l'azote et du carbone dans les sols;
- implanter davantage de couverts dans les systèmes de culture (cultures intercalaires de vergers et vignobles en grande culture...);
- développer l'agroforesterie et les haies;
- optimiser la gestion des prairies;
- réduire la production de méthane des bovins en modifiant la ration des animaux;
- réduire les apports protéiques de la ration pour limiter les rejets d'azote dans les déjections;
- capter le méthane produit par la fermentation des effluents d'élevage pendant leur stockage, soit en le récupérant quand cela est possible, soit en le brûlant en torchère (le pouvoir de réchauffement du CO₂ produit étant 20 fois inférieur à celui du méthane);
- réduire la consommation de combustibles fossiles en améliorant l'isolation et le chauffage des bâtiments et des serres et en optimisant la consommation de gazole des tracteurs.

Cette étude suppose que la demande de produits agricoles reste à peu près constante. Il faudrait davantage s'intéresser à l'évolution possible de la demande. On sait, par exemple, qu'il serait très profitable du point de vue écologique, de réduire la consommation mondiale (et aussi française) de protéines animales au profit de protéines végétales. Cette tendance pourrait être favorisée par une politique d'incitation et par la mise au point de produits nouveaux de bonne qualité gustative. L'étude de l'INRA ne parle pas non plus de la problématique des biocarburants.

LA FORÊT

Les forêts couvrent 31 % des surfaces de la Terre (30 % pour la France). Les écosystèmes forestiers contiennent à peu près autant de carbone que le carbone du CO₂ atmosphérique.

Si les surfaces de forêt sont en augmentation continue en France et dans l'Union européenne, elles sont au contraire en diminution au niveau mondial. Même si la vitesse de déforestation tend à diminuer, elle reste importante, surtout pour les forêts naturelles tropicales. La baisse du stockage de carbone liée à la déforestation dans les zones tropicales équivaut à environ 8 % des émissions de CO₂ liées à l'utilisation de combustibles fossiles, mais elle est en partie compensée par l'augmentation du stockage de carbone par les forêts tempérées et boréales. En effet, la productivité des forêts européennes s'est accrue en raison principalement de l'augmentation de la tenue en CO₂ de l'atmosphère et du réchauffement qui a conduit à un allongement des saisons de croissance. Cependant, à l'avenir, les températures plus élevées et les sécheresses plus fréquentes et prononcées devraient aboutir à des effets négatifs, notamment pour la zone méditerranéenne. De plus, l'évolution du climat conduira à une modification des aires de répartition des espèces d'arbres et il est particulièrement important de s'assurer que les décisions en matière de gestion des forêts anticipent les changements en raison de la faible vitesse de croissance et de la longue durée de vie des arbres.

Il est clair que l'utilisation du bois tiré des forêts entretenues en tant que matériau contribue efficacement au stockage du carbone. Une politique d'encouragement à l'utilisation de bois en remplacement d'autres matériaux de construction comme l'acier, le béton ou les briques devrait être pratiquée partout dans le monde, comme c'est déjà en partie le cas dans les pays nordiques. Le remplacement des matières plastiques par du bois ou des dérivés du bois (papiers, cartons, caisses...) devrait aussi être poursuivi et amplifié.

Le GIEC (cité plus haut) et surtout l'INRA ont développé un grand nombre de programmes pour évaluer les impacts du

changement climatique dans les domaines de l'agriculture et de la forêt. Il faut citer en particulier le « méta programme » ACCAF (Adaptation de l'agriculture et de la forêt au changement climatique) de l'INRA qui comprend toute une série de programmes spécifiques français :

- « Climagie » pour les prairies;
- « Foradapt » pour les forêts;
- « Perpheclim »;
- « Salmoclim » pour les saumons sauvages.

L'INRA participe également à des programmes internationaux :

- « Draft » pour la forêt des zones sèches du sud;
- « Evoltree » pour l'évolution des espèces d'arbres;
- « Informed » pour la forêt méditerranéenne;
- « Grasslandscape » pour les prairies.

LES BIOCARBURANTS

Les biocarburants contribuent-ils à réduire les émissions de GES? Une étude d'analyse de cycle de vie (ACV) réalisée par l'ADEME en 2010 concluait à une réduction pour l'éthanol variant de 66 % à partir de betterave à 49 % à partir de blé. Pour le biodiesel, les esters à base de colza et de tournesol réduisent respectivement de 59 % et de 73 % les émissions de GES. Mais ces ACV ne prennent pas en compte les changements d'affectation des sols (CAS). Une étude de mars 2013 du Commissariat général au développement durable a considéré deux types de CAS :

- les CAS directs, lorsque les cultures destinées à la production de biocarburants sont pratiquées sur des terres qui auparavant stockaient du carbone (pâturages ou forêts);
- les CAS indirects, lorsque les cultures destinées à la production de biocarburants remplacent des cultures destinées à des usages alimentaires. Dans ce cas, cela implique une moindre production alimentaire.

Si l'on suppose que les besoins alimentaires mondiaux sont constants (ils croissent en fait avec l'augmentation de la population mondiale), cela implique la conversion, partout dans le monde, de nouvelles terres qui stockaient auparavant du carbone. Par exemple, en 2014, 45 % des importations d'huile de palme ont été destinées à la production de biodiesel, et on sait que l'huile de palme est synonyme de déforestation, notamment en Indonésie.

Au total, les études scientifiques ont montré que les CAS indirects avaient un fort impact négatif sur le bilan carbone des biocarburants dits de première génération. La Commission européenne en a conclu (octobre 2012) qu'il convenait d'en limiter la production dans l'attente de l'arrivée des biocarburants de seconde génération produits à partir de matières premières non alimentaires, telles que des déchets ou résidus végétaux.

En fait, la transformation de déchets ligno-cellulosiques en éthanol est encore loin d'être au point techniquement et économiquement malgré des décennies de recherche-développement. Par exemple, Greenpeace considère qu'il faudra encore 20 ans pour atteindre un développement industriel. De plus, les problèmes de disponibilité et de collecte de matières premières rendent peu vraisemblable la production de quantités vraiment significatives de biocarburants de seconde génération.

On peut donc conclure que les biocarburants ne constituent pas une solution à long terme pour le remplacement des carburants pétroliers, mais tout au plus un appoint de quelques pour cent. Il serait donc préférable de remplacer les cultures destinées aux biocarburants de première génération par des forêts exploitées pour la production de bois d'œuvre ou de bois énergie.

AMÉNAGEMENT DES TERRITOIRES (PROBLÈMES LIÉS À L'EAU)

Les conséquences des changements climatiques sur le fonctionnement des cycles de l'eau de notre planète ont été décrites dans le

5^e rapport du GIEC et ont fait l'objet d'une note de décryptage jointe du Partenariat français pour l'eau (PFE). Elles seront très variables géographiquement et font l'objet de multiples incertitudes, mais globalement le GIEC note une probable aggravation de la situation des régions déjà touchées par des excès ou des pénuries d'eau. Chaque degré d'augmentation des températures par rapport au scénario 2 °C aggravera ces phénomènes compte tenu notamment des modifications des régimes des pluies et phénomènes d'évapotranspiration : le GIEC estime qu'un degré Celsius de température supplémentaire réduirait de 20 % les ressources renouvelables en eau pour au moins 7 % de la population mondiale (en France moins d'un tiers des apports pluviométriques alimentent les nappes et les rivières, la plus grande partie des pluies étant évapo-transpirée).

Globalement, ce n'est pas une réduction de la quantité d'eaux douces qui menace la planète, mais plutôt une aggravation des disparités de la répartition géographique des eaux douces disponibles, comme des excès d'eau liés aux catastrophes naturelles diverses et risques d'inondations. Pour la France, les scénarios prévisionnels (cf. étude Explore 2070 du ministère chargé de l'Environnement) montrent des évolutions contrastées liées à la diversité des contextes géographiques avec des prévisions de forte réduction d'écoulement des rivières en période d'étiage dans le Sud-Ouest et le Bassin parisien.

Contrairement au cas des programmes de réduction des GES qui relèvent d'une approche globale, le sujet eau implique des approches locales liées aux bassins versants d'alimentation pour les eaux superficielles comme pour les nappes souterraines. Une bonne gestion des ressources en eau implique la disponibilité de réseaux de connaissances pérennes reposant sur de l'acquisition de données hydrologiques, de systèmes d'information permettant de confronter ressources et usages et de modèles hydroclimatiques. Les spécialistes du secteur notent une dégradation majeure des systèmes d'acquisition des données de base qui affaiblit fortement les

capacités d'expertise (notamment dans tous les pays en crise ou en guerre).

Les professionnels du secteur de l'eau ont développé de nombreuses solutions en termes d'atténuation (économies d'énergie, production d'énergie notamment par méthanisation), mais le secteur de l'eau est principalement concerné par les solutions à apporter en termes d'adaptation aux problèmes d'excès d'eau ou pénuries et en particulier de lutte contre les risques de catastrophes naturelles (un recueil de bons « savoir-faire » mis en œuvre par les acteurs français, élaboré par le PFE pour la COP21, est disponible sur le site du PFE).

À l'issue du Forum mondial de l'eau de 2015, les acteurs de l'eau ont retenu les orientations suivantes :

- les changements climatiques obligent à revoir nos horizons classiques de réflexion sur la gestion des eaux et génèrent de nouveaux champs d'incertitudes qui doivent conduire à réviser nos modèles de planification des ressources en eau. Ces conséquences prévisionnelles renforcent l'utilité de développer des outils de Gestion intégrée des ressources en eau (GIRE);
- les dérèglements climatiques et changements globaux sont étroitement liés en termes d'impacts et de conséquences sur la gestion quantitative ou qualitative des ressources en eau;
- la résilience doit devenir un nouveau critère d'évaluation des activités et solutions proposées.

Les dossiers adaptation et lutte contre les catastrophes naturelles (*loss and damages*) ont pris une place grandissante à l'initiative des pays en développement les plus menacés au cours des dernières COP depuis l'accord de Durban. Les contributions des États déposées pour la COP de Paris ont montré une préoccupation majeure des pays du Sud aux conséquences des changements climatiques en termes d'adaptation et il apparaît dans les propositions déposées que le secteur de l'eau représente plus de 80 % des actions à mener identifiées,

qu'il s'agisse d'améliorer la gestion de l'offre (barrages, transferts, etc.) ou la gestion de la demande (économies d'eau, lutte contre les pollutions, recyclage, etc.).

Face à ces menaces, de multiples solutions technologiques sont déployées actuellement, qui ont fait l'objet d'inventaires à l'initiative des Nations unies et pour le secteur de l'eau d'un recueil des solutions proposées par les acteurs français. Pour l'alimentation en eau potable et l'assainissement, un recours accru aux unités de dessalement et à la réutilisation des eaux usées est déjà la solution retenue par de nombreuses villes; le GIEC note à juste titre que les solutions seront plus difficiles pour les petites unités rurales menacées de pénurie.

Les principaux problèmes d'adaptation des ressources en eau/climat concernent les problèmes liés à l'énergie et surtout au devenir des activités agricoles.

Pour l'énergie, le potentiel de production hydroélectrique restant valorisable dans certains pays apparaît important. Les problèmes liés aux besoins en eau pour le refroidissement des unités thermiques de production ont déjà dû faire l'objet de mesures de régulation pour nos centrales nucléaires françaises en rivière. L'exploitation de gaz de schiste nécessite de forts volumes d'eau avec des risques de contamination chimique.

Le cas de l'agriculture est multifactoriel, car c'est le complexe température/eau/sol/varieties végétales qui va déterminer les évolutions futures : la plus grande partie de l'eau « valorisée » en agriculture l'est en « agriculture pluviale » qui a des problèmes d'adaptation importants à affronter (gestion des sols, choix des semences, risques d'extensions de zones de désertification). L'agriculture irriguée doit résoudre des problèmes plus classiques d'adaptation offre/demande qui peuvent passer par la création de nouvelles ressources en eau, des programmes d'économie d'eau ou de changement de culture (problème du maïs bien connu pour le Sud-Ouest de la France). À l'occasion de la COP21, la France a valorisé les opportunités offertes par les nouveaux modèles liées à l'agroécologie et à l'intérêt de développer

des actions de protection des sols agricoles pour réduire les intrants et comme potentiel important de stockage de carbone (programme dit 4 ‰²⁰ promu par le ministère chargé de l'Agriculture).

En France, les inflexions à apporter à nos modèles de planification des eaux liées au changement climatique ont fait l'objet de nombreux travaux d'études à l'initiative des agences de l'eau et des établissements publics territoriaux de bassin – EPTB – (Programme PIREN-Seine, Garonne 2050, Durance, Meuse, etc.) et sont intégrées désormais dans les Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux (SDAGE) en préparation. Au-delà des contraintes sur les usages de l'eau, c'est l'occasion d'examiner les impacts du changement climatique sur de nombreux autres facteurs liés à des variations attendues de la température ou de l'hydrologie des eaux libres : qualité des eaux, hydro-écologie, devenir faune/flore, vecteurs des maladies, etc.

À l'international, tous ces sujets liés à la gestion et la valorisation de nos ressources en eau sont indissociables des problèmes de développement et à ce titre les acteurs de l'eau au plan international établissent un lien entre les objectifs de développement durable (prévus par la COP21) et climat.

CONCLUSIONS

Il est clair que la gestion des terres : agriculture, élevage, forêt, biodiversité, doit devenir un souci majeur pour l'humanité si l'on veut maintenir le changement climatique à un niveau aussi acceptable que possible.

20. 4 ‰ est le taux de croissance annuel du stock de carbone dans les sols qui permettrait de stopper l'augmentation actuelle du CO₂ dans l'atmosphère. Ce taux de croissance n'est pas une cible normative pour chaque pays, mais vise à illustrer qu'une augmentation, même infime, du stock de carbone des sols (agricoles, y compris les prairies et pâtures, et forestiers) est un levier majeur pour participer au respect de l'objectif de long terme de limiter la hausse des températures à 2 °C. Au-delà de ce seuil, le GIEC indique que les conséquences induites par le changement climatique seraient d'une ampleur significative.

Pour cela, les principales actions à mener sont :

- au niveau mondial, protéger et développer les forêts et en premier lieu les forêts tropicales soumises à la déforestation. Pour cela, il faudra améliorer la productivité agricole là où elle est aujourd’hui largement insuffisante, en particulier en Afrique;
- dans les pays développés et donc en France et en Europe, il faudra transformer les pratiques de grandes monocultures intensives en polycultures plus respectueuses de l’environnement tout en restant malgré tout à un niveau de productivité élevé;
- améliorer considérablement la gestion et l’utilisation des forêts, y compris en France avec un développement du bois matériau et une récupération des déchets pour la production d’énergie.

Tout cela aura un coût, mais quelques chiffres permettront de mettre en évidence que ce coût pourra être compensé par des mesures d’économie :

Entre 1986 et 2017 en France :

- Le nombre d’actifs agricoles est passé de 2 millions à 0,9 million et le nombre d’exploitations de 1 million à 0,4 million. Aider ce petit nombre d’actifs et en augmenter le nombre pour mieux gérer l’environnement ne devrait pas coûter trop cher.
- Sur la même période, les effectifs du ministère de l’Agriculture ont à peine diminué (de 34 200 à 32 200), ceux des Sociétés d’aménagement foncier et d’établissement rural (SAFER) et des chambres d’agriculture ont augmenté de 30 % (rapport de la Cour des comptes).

Changement climatique

un défi pour les ingénieurs

Les scientifiques et les ingénieurs ont un rôle majeur à jouer pour l'avenir de l'humanité : ce sont eux qui ont pu alerter le monde sur le danger que court le climat de la planète et sur ses conséquences ; ce sont eux qui en ont identifié une cause très probable et sur laquelle nous pouvons réagir. Notre action dépend de nombreux facteurs : prise de conscience universelle, volontés politiques, solidarité entre les Etats et les peuples, moyens financiers... mais aussi in fine moyens scientifiques et techniques. Cependant, les ingénieurs ne sont pas des magiciens. Remplacer l'usage des ressources énergétiques traditionnelles, stockées depuis des millions d'années, par des ressources non carbonées, autant que possible renouvelables (nucléaire, hydraulique, géothermie, biomasse, vent, soleil...) demande du temps.

L'objet de ce livre est double : montrer d'une part l'attention que les ingénieurs et scientifiques portent à cette menace fondamentale et leur compréhension du problème, d'autre part leur souhait de participer davantage aux débats et aux décisions, avec l'espoir d'aboutir à des orientations et des réalisations plus efficaces en faveur de l'objectif recherché. Les auteurs estiment que par leur indépendance, leur objectivité, leurs compétences et leur pragmatisme, les ingénieurs devraient contribuer au rapprochement entre rêve et réalité.

IESF

7 rue Lamennais
75008 Paris
Tél : 01 44 13 66 88
www.iesf.fr


www.edpsciences.org

ISBN : 978-2-7598-2249-2

