



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences

Avis sur la transition énergétique

(dans le cadre du débat sur le projet de loi relatif
à la transition énergétique pour la croissance verte)

adopté par l'Académie des sciences le 6 janvier 2015

Synthèse

Dans le cadre de la loi relative à la transition énergétique, l'Académie des sciences soutient la réduction de la consommation des énergies carbonées fossiles et les dispositions visant à améliorer l'efficacité énergétique. L'Académie estime que les évolutions devraient tenir compte des objectifs économiques fondamentaux, notamment celui de la compétitivité des entreprises, aussi bien que des facteurs scientifiques et technologiques, afin d'être réalistes, d'assurer la sécurité d'approvisionnement et d'augmenter l'indépendance énergétique. Elle observe que le lancement de projets dans le domaine de l'énergie ne devrait se faire qu'après une réflexion stratégique tenant compte des expériences récentes et de la soutenabilité économique des mesures envisagées. L'Académie observe que la lutte contre la précarité énergétique est un enjeu permanent et important qui implique à la fois des choix techniques et des mesures d'accompagnement économique. Elle signale que des sujets d'importance pour la transition, comme celui de l'hydrogène pour le stockage de l'énergie ou celui des gaz de schiste, méritent d'être étudiés avec attention. Les avantages compétitifs tirés de l'exploitation du gaz, source d'énergie fossile nécessaire pour encore longtemps, devraient conduire à une réévaluation de cette question. Ces points sont considérés dans des rapports récents de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques. L'Académie donne les avis suivants sur certains aspects du projet de loi en fonction des objectifs exprimés :

- Le développement des énergies renouvelables intermittentes éolienne et photovoltaïque devrait se faire à un rythme prudent, en tirant profit de l'expérience acquise dans d'autres pays, en anticipant les difficultés d'insertion de ces énergies dans le réseau et de leur effet sur le système électrique dans son ensemble, et en tenant compte de la nécessité de prévoir leur compensation lorsqu'elles ne sont pas disponibles, sans que cela conduise à une augmentation des émissions de CO₂ ou à des importations d'énergie électrique. Les énergies renouvelables non intermittentes dérivées de la biomasse représentent une filière prometteuse qu'il convient de soutenir par l'intensification de la recherche scientifique et technologique sur les méthodes et les procédés (physiques, chimiques, biologiques) de transformation de ces énergies en vecteurs utilisables (électricité, carburant, gaz) avec la meilleure efficacité énergétique et économique.
- Pour ce qui concerne l'énergie nucléaire, le passage à 50 % à l'échéance indiquée (2025) ne tient compte ni des objectifs affichés de la loi (réduction des émissions de CO₂), ni des facteurs techniques et économiques liés à cette réduction. Cette réduction ne pourrait se faire que si des moyens de stockage de l'électricité à grande échelle devenaient disponibles, évitant le risque de déstabilisation du réseau et le recours à des centrales thermiques de compensation génératrices de CO₂, pour suppléer les énergies renouvelables. Le rythme devrait alors être plus lent que celui qui est visé, pour que le processus ne dégrade pas notre position favorable en ce qui concerne les émissions de CO₂ et ne déstabilise pas une filière dans laquelle la France dispose d'un haut niveau de compétence, d'atouts industriels et de capacités d'exportation considérables.
- L'efficacité énergétique peut être notablement améliorée dans le domaine de la mobilité et, au-delà du véhicule électrique, il faudrait concentrer l'effort sur des solutions thermiques et hybrides économes, car la majeure partie du parc automobile et la quasi-totalité des véhicules utilitaires relève toujours de ce type de motorisation, et ce pour encore longtemps.
- Les économies qui pourraient être faites dans le domaine du bâtiment par une meilleure utilisation de l'énergie sont potentiellement intéressantes, elles nécessitent un niveau de financement public et privé sur le long terme et, de ce fait, les actions qui seraient engagées dans ce domaine devraient faire l'objet à chaque étape d'une évaluation quantitative en termes de performance énergétique.
- Contrairement à certaines idées reçues, les questions de l'énergie et celles des réseaux de collecte et de transport sont loin d'être réglées, pour des raisons non seulement économiques et géopolitiques, mais aussi scientifiques et techniques. Dès lors il faut, pour avancer dans ce domaine, que la science et la technologie soient largement mobilisées.

Avis

L'Académie des sciences a publié plusieurs documents relatifs aux questions énergétiques, notamment fin 2012 un rapport sur *La recherche scientifique face aux défis de l'énergie* (EDP Sciences, 250 pages, décembre 2012) et, plus récemment, un avis sur les *Éléments pour éclairer le débat sur les gaz de schiste* (15 novembre 2013). À l'occasion du projet de loi en débat sur la transition énergétique, l'Académie des sciences souhaite faire quelques observations dans le champ de ses compétences.

Le préambule du projet de loi donne la priorité à une baisse des émissions de gaz à effet de serre (GES), à la réduction de la combustion des énergies fossiles et à des efforts pour diminuer autant que possible la consommation globale d'énergie. D'une façon générale, l'Académie des sciences soutient toute évolution conduisant à réduire la part des combustibles carbonés fossiles dans la production d'énergie ainsi que les dispositions visant à améliorer l'efficacité énergétique, tout en notant que l'évolution impulsée par la loi doit respecter les objectifs économiques fondamentaux et, de ce point de vue, éviter de grever la compétitivité des entreprises, et même permettre d'améliorer leur position et celle du pays. Elle note aussi que la lutte contre les émissions de CO₂ et contre les autres GES, dans laquelle notre pays et l'Europe se sont engagés, n'aura de sens que si l'effort dans ce domaine est effectivement partagé par tous les États, au niveau mondial. Il faudrait pour cela qu'il y ait accord sur un indicateur d'émissions qui représenterait au mieux l'effort à réaliser par chaque pays, ce qui permettrait d'adapter les politiques respectives et les moyens à mettre en œuvre pour atteindre l'objectif défini en commun. L'Académie rappelle que la France est, parmi les pays développés, l'un des plus faibles émetteurs de gaz à effet de serre par habitant (1)¹ (2) et l'un des plus avancés dans la production d'électricité décarbonée (3) (Réf. [1]² et [2]).

L'Académie souhaite ajouter quelques commentaires sur certains dispositifs de ce projet de loi, dont la cohérence avec les objectifs annoncés mérite d'être analysée de façon critique.

Le projet propose *une augmentation de la part des énergies renouvelables dans la consommation finale d'énergie de 16 % en 2012 à 32 % en 2030. Pour la seule production d'électricité il est prévu de faire passer l'ensemble hydraulique-éolien-solaire de 20 % à 40 % du total.*

Les ressources hydrauliques étant pratiquement exploitées à leurs limites naturelles, il est donc bien question, pour la production d'électricité, de l'éolien et du solaire. Or ce sont des sources intermittentes, qui fluctuent en permanence, ce qui impose quelques observations (Réf. [10-14]) :

- L'objectif de 2030 ne semble accessible que si un début de moyens de stockage de l'électricité à grande échelle est disponible (Réf. [7], [19]) : c'est la seule façon d'éviter que l'intermittence de ces sources d'énergie ne conduise à utiliser des combustibles fossiles lorsqu'elles ne fournissent pas l'énergie demandée. On peut de ce point de vue noter qu'en Allemagne la croissance

¹ Les numéros entre parenthèses se rapportent à des notes dans l'annexe.

² Les numéros entre crochets correspondent à des références données dans cette annexe.

de l'offre intermittente d'électricité d'origine renouvelable a nécessité l'ouverture de nouvelles capacités de production thermiques à charbon (13 GW) ainsi que le développement de l'exploitation du lignite conduisant à des émissions accrues de CO₂ et surtout de polluants (oxydes d'azote et de soufre à l'origine des pluies acides...). Ce constat devrait nous inciter à introduire de façon prudente (4) (Réf. [3]) et progressive des énergies qui ne sont ni contrôlables ni distribuables en fonction des besoins. Pour les éoliennes actuellement installées en France, le facteur de charge, c'est-à-dire le rapport entre l'énergie réellement produite et l'énergie maximale affichée par la puissance installée en fonctionnement permanent, est seulement de 23 %. Ce facteur de charge est de 13 % pour le photovoltaïque. L'intermittence correspondante implique la mise en œuvre d'autres énergies afin de compenser les indisponibilités de ces renouvelables. Faire appel à des centrales thermiques aurait le double inconvénient de grever le budget et d'accroître les émissions de CO₂ et de polluants. Une utilisation régionale des énergies renouvelables, avec stockage thermique et réseaux de chaleur ou stockage chimique sous forme d'hydrogène ou de carburant de synthèse, pourrait constituer une solution partielle, mais la possibilité de les déployer à grande échelle n'a pas été démontrée et elle nécessite encore un effort soutenu de recherche scientifique et technologique.

- L'insertion d'énergies renouvelables dans le réseau nécessite de restructurer le transport électrique pour raccorder les lieux de production, collecter les énergies électriques produites de façon diffuse et les faire remonter vers les lieux de consommation. On peut là encore s'appuyer sur l'expérience allemande (Réf. [5]) pour noter que l'insertion accélérée des renouvelables a eu des conséquences négatives sur le système électrique avec des difficultés de transport de l'énergie électrique produite vers les centres de consommation, et une production d'énergie locale qui ne trouve pas de consommateurs sur place, d'où l'apparition de prix négatifs pour l'électricité produite alors que le prix du kWh a fortement augmenté pour les ménages (Réf. [20]).
- Afin de minimiser le risque d'un *black-out* à l'échelle du pays ou à celui de l'Europe, il est important d'anticiper les problèmes de stabilité de réseau qui pourraient être induits par les variations soudaines des niveaux de puissance des éoliennes et des fermes solaires en fonction des conditions de vent ou d'ensoleillement.
- Quelles pourraient être les solutions qui éviteraient de traiter le manque de flexibilité des énergies solaire et éolienne par un appel massif à des énergies fossiles, avec une augmentation paradoxale mais inévitable des émissions de GES et de polluants atmosphériques ?

Les énergies renouvelables non intermittentes issues de la biomasse offrent des possibilités prometteuses qui méritent d'être explorées en intensifiant les recherches et développements de méthodes et de procédés de conversion efficaces pour la production de vecteurs énergétiques transportables (carburant/gaz) ainsi que des systèmes combinant biomasse/biogaz et électricité renouvelable.

En ce qui concerne le nucléaire le projet prévoit deux dispositifs :

- *une réduction de la part du nucléaire à 50 % de l'électricité dès 2025 ;*
- *un plafonnement de la puissance nucléaire installée au niveau actuel (63 GW).*

Là encore quelques observations s'imposent (Réf. [6-9]):

- L'énergie nucléaire étant décarbonée, son utilisation place la France parmi les pays développés les moins émetteurs de GES (presque 2 fois moins par habitant qu'en Allemagne). L'industrie nationale étant remarquablement compétente dans ce domaine, ce sont d'autres considérations que celles qui sont affichées dans le préambule de la loi qui ont prévalu dans ce cas. La réduction visée pour 2025 paraît à la fois trop rapide et peu compatible avec les objectifs de cette loi (Réf. [3] (5)).
- Il faut prendre garde à ce que, en attendant le déploiement de futurs EPR, seules nos centrales les plus anciennes, celles de 900 MW, sont adaptées à l'utilisation de combustible MOX, qui recycle du plutonium issu du retraitement du combustible usé. Leur arrêt immédiat poserait donc le problème d'une autre gestion de cet élément que celle mise en place pour aller vers les réacteurs de quatrième génération.
- Les réacteurs nucléaires de quatrième génération (Réf. [8-9]) pourraient permettre de disposer vers la fin de ce siècle d'un parc nucléaire autonome en combustible et ce pour des siècles. Leur mise au point nécessite un effort de recherche important et soutenu.

Dans le domaine du transport des personnes, le projet de loi met l'accent sur le véhicule électrique avec notamment un objectif d'implantation de nombreux points de recharge et des aides à l'accès aux véhicules électriques. On peut rappeler que la préférence pour les véhicules électriques n'a de sens que si la production d'électricité est essentiellement décarbonée (Réf. [16] (6)) et c'est effectivement le cas en France grâce à la part importante du nucléaire dans la production d'électricité. C'est beaucoup moins le cas en Allemagne ou dans nombre d'autres pays où l'électricité est produite de façon majoritaire par des centrales à combustibles fossiles. Il est aussi important de penser au transport routier de marchandises et aux engins de chantier ou agricoles qui utilisent tous des motorisations traditionnelles, difficilement remplaçables par des solutions électrifiées. Dans le contexte actuel, des réductions importantes de consommation peuvent être obtenues sur des véhicules classiques équipés de moteurs thermiques ou hybrides, comme les projets de véhicules à 2L/100 km. Il serait judicieux de ne pas négliger ces possibilités, qui peuvent être à la fois sources de progrès dans le domaine des émissions de GES et d'avantages en termes de compétitivité pour l'industrie automobile.

En ce qui concerne l'efficacité énergétique des bâtiments, la lutte contre le gaspillage, et la proposition sur l'analyse du cycle de vie complet des produits que nous consommons, on ne peut qu'approuver les objectifs affichés. Un bilan périodique de ces mesures s'imposera afin de vérifier les gains en termes de performance énergétique et de veiller à ce que le coût des rénovations thermiques des bâtiments reste dans des objectifs raisonnables de 200 à 500 € le m² pour l'ancien, et un surcoût de 5 à 10 % pour le neuf (Réf. [17-18]). Un coût global de

l'ordre d'une dizaine de milliards d'euros par an pour 500 000 logements par an est un objectif techniquement accessible.

Le sujet du gaz et plus spécifiquement celui des gaz de schiste n'est pas abordé dans le projet de loi. Pourtant, l'exploitation des gaz de schiste aux États-Unis a donné à ce pays un avantage compétitif considérable en réduisant sa dépendance par rapport aux importations et a été à la source du renouveau de son industrie chimique. En même temps, l'utilisation du gaz à la place du charbon pour la production d'électricité a conduit à une baisse sensible de ses émissions de CO₂ et simultanément à une réduction de la pollution atmosphérique. Ce constat conduit donc à se demander si un tel développement ne peut être envisagé en France ou en Europe. Des ressources potentielles existent mais l'exploration et l'exploitation de ces hydrocarbures non-conventionnels fait débat. Il convient donc, au regard des nouvelles incertitudes qui pèsent sur la sécurité d'approvisionnement, de réconcilier nos objectifs économiques et les possibilités de réduction de nos importations d'hydrocarbures d'une part, avec les inquiétudes sur l'impact de l'exploitation du gaz de schiste sur l'environnement d'autre part. Ce sujet est abordé dans un avis de l'Académie des sciences, dans un rapport de l'OPECST (Réf. [22]) et dans une étude (Réf. [23]) de l'European Academies Advisory Scientific Council (EASAC). Ce dernier rapport conclut que les questions soulevées par l'exploitation des hydrocarbures non-conventionnels européens méritent d'être analysées par les décideurs mais qu'il n'y a pas d'obstacle insurmontable à leur exploration et à leur exploitation.

Enfin, l'Académie souligne l'importance de la recherche et de l'innovation (Réf. [7], [3] (7) et [24] (8)) évoquées dans un article de la loi mais sans qu'il soit fait mention de leur rôle déterminant alors qu'elles devraient être largement encouragées et sollicitées dans tous les domaines de l'énergie : stockage de l'énergie à grande échelle sous forme d'hydrogène ou de carburants de synthèse issus de la biomasse ou dérivés du CO₂, amélioration des performances des batteries ou de piles à combustible, utilisation de supercondensateurs dans diverses applications, développement de nouveaux procédés de production de biocarburants, stabilité des réseaux, réseaux intelligents, amélioration et diversification des sources d'énergies renouvelables, efficacité énergétique pour la mobilité, nucléaire actuel ou celui de quatrième génération et leur sûreté... Contrairement à l'idée répandue par certains, que toutes les solutions existent et qu'il suffirait de les mettre en œuvre, les questions de l'énergie sont loin d'être réglées, et ce pour des raisons à la fois scientifiques, techniques, économiques et géopolitiques. Le problème doit être envisagé dans toute sa complexité au travers d'une réflexion permanente sur l'ensemble du système et en s'appuyant sur tous les moyens de la science et de la technologie.

Annexe

L'avis du Comité de prospective en énergie (CPE) de l'Académie des sciences a été élaboré à partir de ses travaux sur la transition énergétique engagés depuis juin 2013. Cet avis a été présenté au Comité restreint du 2 décembre 2014 et adopté par l'Académie des sciences le 6 janvier 2015. Ce texte a été préparé par :

Roger Balian (physicien), Sébastien Balibar (physicien, CNRS, École normale supérieure), Yves Bréchet (physicien, Institut national polytechnique de Grenoble), Édouard Brézin (physicien, École normale supérieure, ancien président de l'Académie des sciences), Sébastien Candel (président du CPE, Sciences mécaniques, École centrale Paris), Catherine Césarsky (astrophysicienne, Haut conseiller scientifique, CEA), Michel Combarnous (Sciences mécaniques, Université de Bordeaux), Vincent Courtillot (géophysicien, Université Paris Diderot et Institut de physique du Globe de Paris), Jean-Claude Duplessy (géochimiste, CNRS, président de la CNE), Pierre Encrenaz (astrophysicien, Université Pierre et Marie Curie), Marc Fontecave (chimiste, Collège de France), Robert Guillaumont (chimiste, Université de Paris-sud Orsay), Guy Laval (physicien, CNRS), Marc Pélegrin (Sciences mécaniques, Office national d'études et de recherches aérospatiales), Olivier Pironneau (mathématicien appliqué, Université Pierre et Marie Curie), Michel Pouchard (chimiste, Université de Bordeaux), Paul-Henri Rebut (physicien, ancien directeur du Jet et d'Iter), Didier Roux (chimiste, directeur de la recherche et de l'innovation du groupe Saint Gobain), Bernard Tissot (géologue, géochimiste, président du CPE, président honoraire de la CNE)

tous membres de l'Académie des sciences.

Cet avis s'appuie sur des auditions et des visites réalisées par le CPE au cours de l'année 2013-2014 et notamment :

- Mardi 18 juin 2013 - Audition de Pascal Bain - Positionnements thématiques et instruments de financement sur projet - Allemagne, États-Unis, Japon, Royaume-Uni, et évolution des recherches soutenues par le programme Énergie durable de l'ANR.
- Mardi 22 octobre 2013 - Audition de Jean-Marie Chevalier - Professeur à Paris Dauphine - La transition énergétique : les vrais choix.
- Mardi 10 décembre 2013 - Audition d'Hervé Laffaye - RTE - Transition énergétique : quels enjeux et quels défis pour le système électrique ?
- Mardi 18 mars 2014 - Audition de Gilles Bellec - Ingénieur général des mines - Référent Énergie au Conseil général de l'économie - La transition énergétique.
- Lundi 28 avril 2014 - Visite du Centre national du système électrique (RTE) et audition de Jean-Paul Roubin.
- Mardi 20 mai - Intervention de Didier Roux - Efficacité énergétique des bâtiments.
- Mardi 28 octobre - Intervention de Yves Bréchet, Haut-commissaire à l'énergie atomique – Les mix énergétiques.

L'avis s'appuie également sur les présentations faites dans des réunions et conférences traitant du thème de l'énergie (avec participation des membres du CPE) :

- Colloque sur la transition énergétique organisé par le CNRS le 21 janvier 2014.
- Les scénarios de l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (ANCRE), 29 avril 2014.
- Journée de réflexion sur la transition énergétique en Allemagne organisée par l'OPECST, Sénat, 25 septembre 2014.
- Stockage de l'énergie, conférence organisée par JM Tarascon dans le cadre de la Fondation Ecologie d'Avenir, 9 octobre 2014.
http://www.fondationecologiedavenir.org/Colloque_Stockage_Energie/
- Colloque sur les sciences du démantèlement des installations nucléaires, Paris 8 et 9 octobre 2014.

Des membres du CPE participent aux travaux de plusieurs instances nationales ou internationales du domaine :

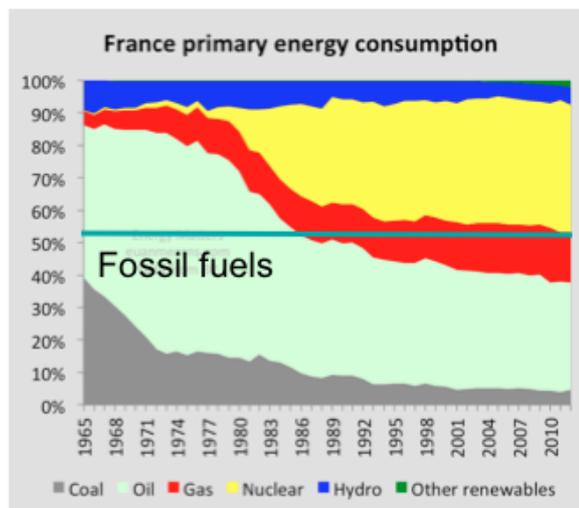
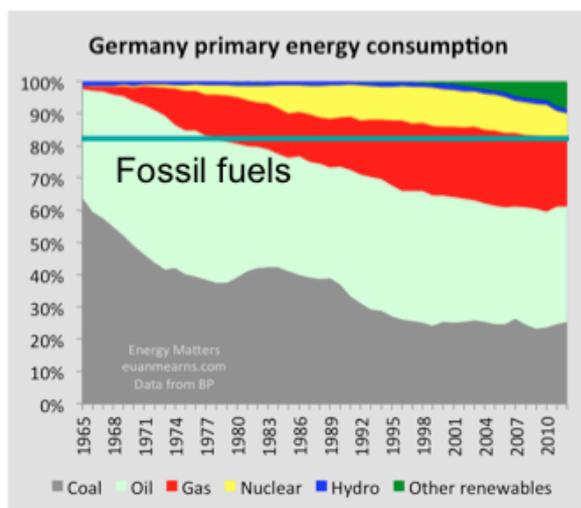
- Comité de programme scientifique Énergie de l'ANR
- Commission nationale d'évaluation (CNE)
- Comité d'experts auprès de la Cour des comptes pour le rapport « La mise en œuvre par la France du paquet énergie-climat »
- European Academies Science Advisory Council (EASAC) Energy Steering Panel

Quelques notes

(1) L'indice d'émission de CO₂ par an et par habitant d'après Key World Energy Statistics (2014) Réf. [1] :

	Population (millions)	Émissions de CO ₂ (Mt) par an	Indice d'émission (tCO ₂ /hab an)
États-Unis d'Amérique	314	5074.14	16.15
Allemagne	81.92	755.27	9.21
France	65.43	333.89	5.1

La bonne performance de la France au niveau des émissions de CO₂ par habitant et par an est due au fait que la majeure partie de la production d'électricité est réalisée par des centrales nucléaires et hydrauliques. Il n'est pas de même au niveau mondial où l'énergie électrique est essentiellement fournie par des combustibles fossiles.



*Répartition de la consommation d'énergie primaire en Allemagne et en France. En Allemagne, la baisse de charbon et du pétrole est principalement compensée par la croissance du gaz naturel et de l'énergie nucléaire jusqu'en 2006. L'expansion des énergies renouvelables (hors hydraulique) a comblé le vide laissé par la réduction de la production nucléaire depuis 2006. En 2012, plus de **80 %** de l'énergie primaire est encore fournie par des sources fossiles en Allemagne.*

*En France, la diminution sur le long terme du charbon et du pétrole est principalement compensée par la croissance de l'énergie nucléaire à partir de 1980. La part de l'énergie hydroélectrique diminue légèrement tandis que la part d'autres énergies renouvelables augmente à partir de 2004, mais à un rythme lent. En 2012, **53 %** de l'énergie primaire est fournie en France par des sources fossiles. (Adapté de Euan Mearns, données BP).*

(2) Intensités d'émissions comparées de gaz carbonique par M€ de PIB

Voir rapport de la Cour des comptes (page 59) Réf. [2].

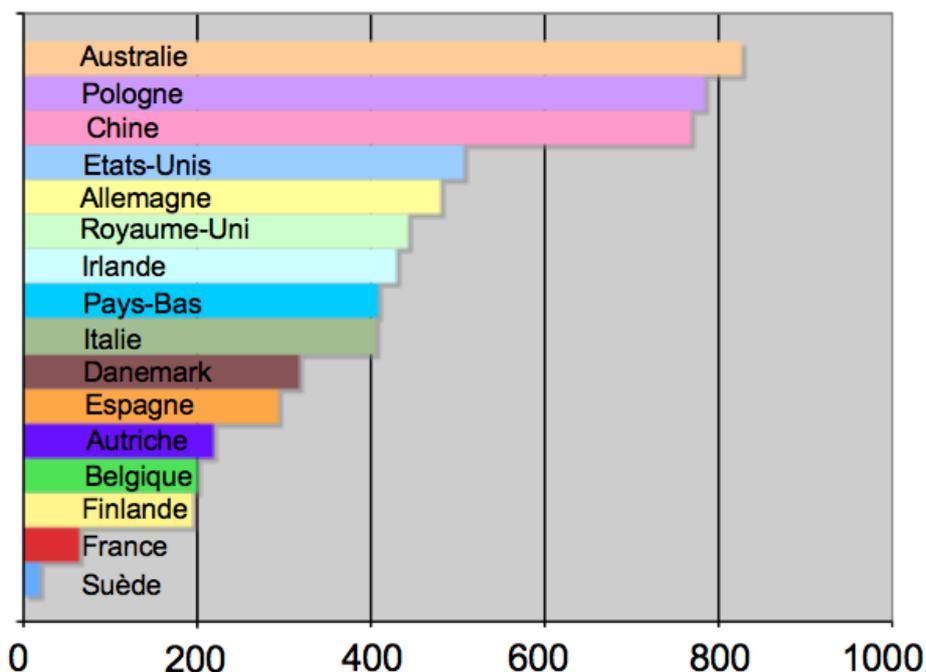
Avec 227 t CO₂ émises par M€ de PIB, la France est l'une des économies parmi les moins carbonées en Europe, la deuxième après la Suède. Rapportées au PIB, les émissions françaises représentent ainsi moins des 2/3 de la moyenne de l'Union européenne ou des émissions de l'Allemagne, et à peine plus de la moitié de celles des Pays-Bas.

Cette spécificité est très essentiellement due à une production électrique qui est aux 3/4 issue du nucléaire et au 1/6 de sources renouvelables. Au total, l'électricité est ainsi, en France, produite à plus de 90 % à partir de sources non-émettrices de CO₂.

(3) L'énergie électrique en France est faiblement carbonée.

Voir Rapport de la Cour des Comptes (page 45) Réf. [2].

À l'exception de la Suède, dont le mix électrique est caractérisé par une forte hydraulité (50 %) et l'importance du nucléaire (40 %), l'énergie électrique en France est la plus faiblement carbonée de l'UE avec 79 gCO₂ /kWh contre 439 gCO₂ /kWh pour l'Europe des 27 et 461 gCO₂ /kWh pour l'Allemagne où la filière charbon demeure importante en dépit de la progression des renouvelables.



Émissions en gCO₂ par kWh pour l'année 2011 (données IEA, CO₂ emissions from fuel combustion highlights, Réf. [25]).

(4) Réf. [3] p. 21 : *...il serait prudent sauf rupture technologique majeure, d'envisager la transition énergétique sur une période longue, débordant sur la seconde partie du siècle.*

(5) Réf. [3] p.37 : *Dans le cadre du débat sur la transition énergétique, un objectif de 50% de la part de l'électricité nucléaire à l'horizon 2025 a été fixé : c'est un calendrier très accéléré par rapport à la « trajectoire raisonnée » de l'OPECST...*

(6) Réf. [16] p.6 *...Il faut aussi rappeler que le véhicule électrique ne représente une réelle économie en CO₂ que si le mix électrique est majoritairement décarboné. C'est le cas en France où en moyenne le VE représente 11 g de CO₂ /km (au lieu de 175 g pour un véhicule thermique); c'est moins le cas en Allemagne avec un mix électrique peu décarboné ou le VE représente 120 g de CO₂ /km à peine mieux qu'un diesel moderne...*

(7) Réf. [3] p. 25 : *L'OPECST a perçu d'emblée la dimension déterminante de l'innovation dans la réussite de la transition énergétique...*

(8) Réf. [24] p. 121 : *Miser plus encore sur la recherche pour répondre à ces enjeux stratégiques paraît donc indispensable pour placer ainsi la France en tête dans la maîtrise industrielle et donc commerciale des énergies renouvelables futures...*

Références

- [1] International Energy Agency (2014) World energy statistics, Paris.
- [2] Cour des comptes (2013). *La mise en œuvre par la France du paquet énergie-climat*. Cour des comptes, Paris (www.ccomptes.fr).
- [3] B. Sido, JY. Le Déaut (2013). *La transition énergétique à l'aune de l'innovation et de la décentralisation*. Office Parlementaire des Choix Scientifiques et Technologiques. N° 1352. www.assemblee-nationale.fr/opecst/
- [4] JM. Chevalier, M. Cruciani et P. Geoffron (2013). *Transition énergétique. Les vrais choix*. Odile Jacob, Paris.
- [5] J. Guidez (2012). Point sur la situation énergétique en Allemagne, dix-huit mois après la décision d'abandon du nucléaire. *RGN N° 5*, Sept-Octobre 2012.
- [6] R. Dautray et J. Friedel (2013). Le plutonium et la cohérence du parc électronucléaire français, *CR Physique 14*, (2013), 228-247.
- [7] Académie des sciences (2012). *La recherche scientifique face aux défis de l'énergie*. EDP sciences.
- [8] C. Béhar (2014). L'énergie nucléaire au XXI^e siècle : quels avenir. *La Lettre de l'I-tésé*, numéro 22, été 2014.
- [9] Commission nationale d'évaluation (2014). Rapport d'évaluation n°8 (www.cne2.fr), *Scénario industriel de déploiement des RNR de 4^e génération en France*, pages 67-70.
- [10] F. Wagner (2014). Considerations for an EU-wide use of renewable energies for electricity generation. *Eur. Phys. J. Plus*, 129, 219.
- [11] ANCRE (2013). Les scénarios de l'ANCRE pour la transition énergétique. <http://www.allianceenergie.fr>
- [12] JL. Bobin, H. Flocard, JP. Pervès et B. Tamain (2013). Les contributions des énergies intermittentes à l'amélioration du bilan carbone. Responsabilité et environnement, *Annales des Mines*, N° 69 (janvier) pp. 43-49.
- [13] *Proceedings of the IEEE* (2012). The intermittency challenge: massive energy storage in a sustainable future. Vol. 100 (2), 317-549.
- [14] Colloque réseaux (2013). L'insertion des renouvelables, une contrainte pour les réseaux électriques. Palais du Luxembourg, 17 octobre 2013.
- [15] Société chimique de France (2014). Position de la Société chimique de France sur la loi de transition énergétique pour une croissance verte. <http://www.societechimiquedefrance.fr>

- [16] JC. Bernier (2014). Analyse approfondie du projet de loi sur la transition énergétique pour une croissance verte. <http://www.societechimiquedefrance.fr>
- [17] O. Tomasini (2013). Rapport FFB Évolution Prix bâtiments. http://www.btp87.ffbatiment.fr/Files/pub/Fede_D87/DEP_ACTUALITE_5710/33c79d7e96ef4b20be6e1323ea7deefe/PJ/rapport-preconisations-simplifications-reglementaires.pdf
- [18] Guide Anah (2010). Rénovation Thermique. <http://www.anah.fr/les-publications/les-guides-pratiques/vue-detaillee/article/les-travaux-de-renovation-thermique-les-plus-efficaces/>
- [19] B. Dunn, H. Kamath and JM. Tarascon (2011). Electrical energy storage for the grid: a battery of choices. *Science*, 334, 928-934.
- [20] Commissariat général à la stratégie et à la prospective (2014). *La crise du système électrique européen. Diagnostics et solutions*. Avec les contributions de Marc Oliver Bettzüge, Dieter Helm et Fabien Roques. www.strategie.gouv.fr
- [21] L. Kalinowski et JM. Pastor (2013). L'hydrogène : vecteur de la transition énergétique ? Office Parlementaire des Choix Scientifiques et Technologiques. N° 1672. www.assemblee-nationale.fr/opecst/
- [22] C. Bataille et J.M. Lenoir (2013). Les techniques alternatives à la fracturation hydraulique pour l'exploration et l'exploitation des hydrocarbures non conventionnels. OPECST, N° 158. www.assemblee-nationale.fr/opecst/
- [23] EASAC (2014). Shale gas extraction: issues of particular relevance to the European Union. Executive summary and statement. www.easac.eu
- [24] Cour des comptes (2013) *La politique de développement des énergies renouvelables*. www.ccomptes.fr
- [25] International Energy Agency (2013) CO₂ emissions from fuel combustion highlights. Paris.