À la recherche du **mix énergétique idéal**

L'idée qu'il existe un mix énergétique idéal semble *a priori* assez simple. Une simplicité trompeuse. **En fonction des critères retenus – réduction des émissions de gaz à effet de serre, fiabilité technologique, coûts de l'énergie, sécurité de l'approvisionnement énergétique, acceptabilité sociétale, etc. – et de la place respective qui leur est assignée, plusieurs mix idéaux se dessinent**. Pour la France, qui dépend encore à 50 % des énergies fossiles pour sa consommation primaire d'énergie, le Gouvernement a décidé d'entamer une transition qui renforce la part des énergies décarbonées, mais selon quel mix ? Les travaux et les études menés par les chercheurs du CEA contribuent fortement à répondre à cette question. Ils soulignent l'importance de l'évaluation technico-économique dans l'élaboration de la trajectoire « objectif » du mix énergétique français.

Le mix énergétique idéal est un concept de nature très directement politique. À un moment donné, ce mix idéal ou, de manière plus pragmatique, mix objectif, incarne, s'il est formalisé, la cible des politiques économiques, techniques (R&D) et réglementaires, selon une logique de programme. Il dépend d'objectifs prioritaires tels que la diminution des émissions de gaz à effet de serre (GES). Il est souhaitable que ce mix idéal/objectif soit redéfini de façon graduelle et sans à-coups majeurs, ces derniers induisant un gaspillage de moyens et des coûts économiques potentiellement très élevés. Depuis quelques années, trois axes ont émergé dans les réflexions menées sur un tel mix : l'importance du long terme, celle de la prise en compte des incertitudes et des risques, et la nécessité d'études économiques coûts-bénéfices pour les évaluer. Au plan opérationnel, si le rôle essentiel de la R&D dans l'atteinte des objectifs est bien établi, encore reste-t-il à mieux le quantifier.

P.-F. Grosjean/CEA

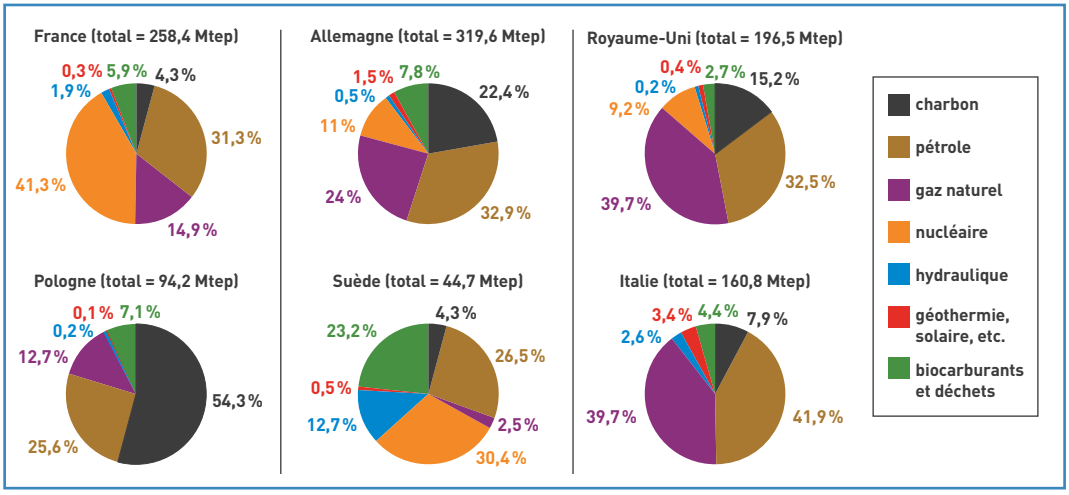
Pour se soustraire à sa dépendance aux énergies fossiles, la France doit entamer une transition énergétique reposant, dans une logique de sobriété et d'efficacité énergétiques, sur une synergie entre l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables. Le CEA y travaille activement. La R&D sur les réacteurs nucléaires du futur est donc incontournable, afin de concevoir des réacteurs de 4e génération qui consommeront l'uranium appauvri alors présent sur le territoire français et le plutonium issu du combustible usé des centrales actuelles, alimentant ainsi le parc pendant potentiellement jusqu'à plus de 5 000 ans sans importer de nouveaux combustibles. Ici, réglage des vannes dans l'installation IRINA, située au Centre CEA de Cadarache, pour des essais sodium.

Le mix français est encore majoritairement fossile

Le mix énergétique d'un État est souvent représenté par le bilan des énergies primaires[1] consommées (mix primaire).

Un premier constat indique que les conditions économiques voisines des pays européens n'ont pas conduit aujourd'hui à des structures de mix proches (figure 1).

(1) Énergie primaire : énergie utilisable avant toute transformation. Il s'agit des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), de l'énergie nucléaire et des énergies renouvelables (hydraulique, solaire, éolien, géothermie, énergie marémotrice, biomasse) et des déchets.



F. Thais/I-tésé/CEA

Figure 1.
Mix énergétiques primaires de plusieurs pays européens par type d'énergie en 2009 (source : Agence internationale de l'énergie AIE). L'approvisionnement total en énergie primaire, exprimé en Mtep, ne prend pas en compte la chaleur et les échanges électriques. Les mix primaires des pays européens ont des structures très différentes. Ils restent majoritairement carbonés.

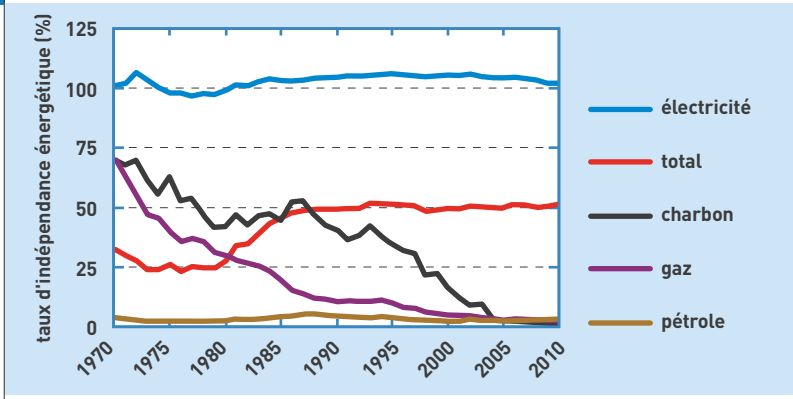


Figure 2.
Évolution du taux d'indépendance énergétique français. En 2010, le taux d'indépendance énergétique (rapport entre la production nationale d'énergie primaire et la consommation primaire non corrigée des variations climatiques) s'élève à 51,2 %, contre 50,3 % en 2009 et 50,9 % en 2008. Il bénéficie principalement de la bonne production électrique.

Bilan énergétique de la France pour 2010, Commissariat général au développement durable, Service de l'observation et des statistiques (SOeS), 2011.

Il faut en déduire que les objectifs énergétiques eux-mêmes restent très liés aux spécificités des pays, même si une ébauche de convergence s'est fait jour *via* le paquet Énergie-Climat.

Un second constat porte sur le caractère encore très carboné des mix, y compris en France. Ainsi, la consommation totale d'énergie primaire française s'est montée à 265,8 Mtep en 2010, dont 43 % provenaient de l'électricité primaire[2] d'origine nucléaire, 31 % du pétrole, 15 % du gaz naturel, 7 % des énergies renouvelables (EnR) et des déchets, et 4 % du charbon. La consommation finale[3] s'est quant à elle élevée à 170 Mtep.

Trente-cinq pour cent du mix primaire français sont consommés par le secteur énergétique. Si l'on exclut les 5 % utilisés pour des usages non énergétiques (industrie chimique, naphta pour les plastiques, bitumes pour les routes...), le reste (rapporté à 100 %) se répartit de la manière suivante : 43 % dans le résidentiel-tertiaire, 32 % dans les transports, 22 % dans l'industrie et 3 % dans l'agriculture.

L'électricité finale est produite par le nucléaire (75 %), les EnR (14 %, principalement hydraulique) et les énergies fossiles (11 %).

Au cours des 20 dernières années, un fléchissement graduel dans la croissance de la consommation finale d'énergie a été observé : alors que sa progression était en moyenne de 4 Mtep par an pendant les années quatre-vingt-dix, elle a été de 2 Mtep en 2001 et 2002. Elle s'est ensuite stabilisée puis a nettement décroché en 2009.

Ces évolutions structurelles se sont accompagnées d'une amélioration très notable de l'indépendance énergétique à partir des années 1980, avec la montée en puissance du parc nucléaire (figure 2).

Les critères d'évaluation des mix énergétiques

Malgré un secteur électrique très peu carboné (voir *Énergie électrique et émissions de CO_2*, p. 11), le mix énergétique de notre pays est donc fortement dépendant des énergies fossiles. Il présente deux caractéristiques majeures : l'émission d'une quantité importante de GES (plus de 5 tonnes/habitant et par an, contre 4,3 tonnes en moyenne mondiale) et l'obligation d'importer massivement des produits énergétiques, la France en étant quasiment dépourvue, EnR exceptées. Notre facture énergétique était ainsi en 2011 de 62 milliards d'euros, chiffre à rapprocher de celui du déficit commercial, de 70 milliards d'euros.

Ce constat contient en lui-même deux des principaux critères d'évaluation du mix dans notre pays : les émissions de GES et la maîtrise des importations. Un consensus assez large réunit l'ensemble des parties prenantes dans l'identification de l'ensemble de ces critères. La Commission Énergies 2050[4], qui a récemment étudié cette question pour le compte du Gouvernement, disposait d'une grille comportant les critères suivants :

- réduction de nos émissions de GES ;
- maîtrise des importations et garantie de la sécurité d'approvisionnement du pays ;
- faisabilité (technologies réalistes à une date donnée, investissements finançables) ;
- renforcement de notre compétitivité (moindre coût complet de production de l'électricité, lequel a un impact sur le PIB – produit intérieur brut –, les emplois, la compétitivité des industries fortement consommatrices d'électricité...) ;
- flexibilité, y compris vis-à-vis des différentes options technologiques ;
- acceptabilité sociale (hydrocarbures liquides, gaz de schiste, nucléaire...).

En toile de fond, la durabilité d'un mix est une question centrale. Nombre de ces critères s'y rapportent.

Les incertitudes : du mix idéal au mix objectif

La conduite d'une politique visant le mix idéal est et sera confrontée à un certain nombre de défis et d'incertitudes portant sur :

- les prix mondiaux des énergies et la géopolitique des ressources ;
- la conjoncture économique mondiale ;
- les accidents énergétiques ;
- l'évolution des technologies (gaz et pétrole de schistes, stockage de l'énergie, captage et stockage du carbone) ;
- l'évolution des opinions publiques en regard des questions énergétiques ;
- le niveau de réussite des nouvelles stratégies énergétiques (en Allemagne notamment).

L'ordre des critères précédents et la sensibilité à ces incertitudes induisent de nombreuses différences dans la façon d'évaluer les mix possibles et par conséquent de tenter de définir un mix idéal ou simplement optimal. En effet, les préférences varient de manière importante selon les pays, les groupes d'individus, les localisations (ville ou campagne), les niveaux de développement (pays du Nord et du Sud), les ressources domestiques (disponibilités en gaz, uranium...), les aléas de l'Histoire (Allemagne de l'Ouest et de l'Est)... Il n'y a donc pas de fonction mathématique unique du bien-être à maximiser : pas de préférences identiques et pas de pondérations toujours claires entre ces préférences, ni dans l'espace, ni dans le temps.

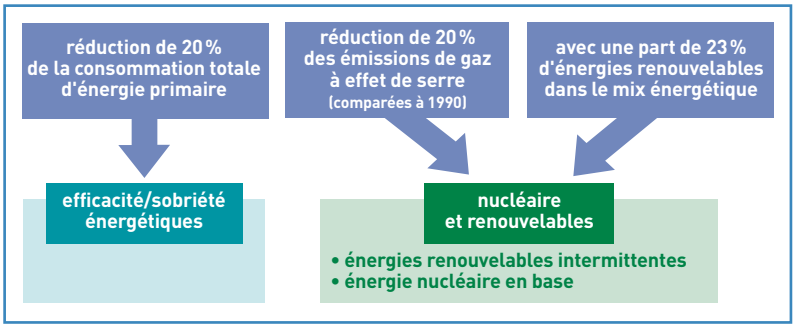
(2) Électricité primaire : électricité produite par les énergies primaires.

(3) Consommation finale d'énergie : ensemble des consommations d'énergie par les utilisateurs finaux (résidentiel-tertiaire, transports, industrie, agriculture...). Elle est égale à la consommation d'énergie primaire moins la consommation d'énergie nécessaire à la transformation des énergies primaires en produits énergétiques utilisables par les consommateurs finaux.

(4) Commission Énergies 2050 : elle a été mise en place en octobre 2011 par Éric Besson, alors ministre chargé de l'Industrie, de l'Énergie et de l'Économie numérique « afin de mener une analyse des différents scénarios possibles de politique énergétique pour la France à l'horizon 2050. »

G. Rolles/REA

Le bâtiment et les transports, deux grands secteurs consommateurs d'énergies fossiles en France et à l'origine de plus de 50 % des émissions de gaz carbonique (CO_2), sont des cibles privilégiées pour le développement des énergies renouvelables. L'intégration de l'énergie solaire dans le bâtiment est un des axes forts du CEA. Ici, maison basse consommation installée sur la plateforme expérimentale Incas du site Ines à Chambéry (Savoie). Elle est équipée de panneaux solaires photovoltaïques et thermiques ainsi que d'un système de gestion de l'énergie locale.



CEA

Figure 3.
Les grands objectifs français d'évolution du mix énergétique. Une énergie en base fonctionne toute l'année.

En sus de ces critères, il importe de considérer la flexibilité et la robustesse, pourtant souvent mal appréhendées. L'assurance d'une bonne résistance aux chocs, parfois appelée résilience, est un autre paramètre pris en considération dans les politiques énergétiques. Elle peut conduire à des choix particuliers non seulement en termes de diversification, de structure d'approvisionnement et de technologies des systèmes énergétiques, mais aussi en termes de R&D, de façon à disposer, le moment venu, d'une large palette de technologies et de compétences nationales ou européennes.
Enfin et surtout, il ne peut y avoir de mix énergétique idéal *in abstracto*, car l'énergie n'est pas la première question à laquelle nos sociétés s'efforcent d'apporter une réponse. Ainsi, la recherche du mix idéal doit-elle se comprendre, à un moment et en un lieu donnés, comme celle d'un chemin vers un mix objectif, une cible mouvante et souvent nimbée de flou... pour rester flexible. Le concept de mix idéal/objectif européen n'est pas pour demain !

Quel mix idéal/objectif pour la France ?

Le mix idéal/objectif est un concept utile pour guider les efforts de la nation à long terme. Les démarches des experts se structurent en fait selon une double dynamique. D'ici vingt ans (les mix de 2030), il s'agira de faire au mieux avec les technologies existantes ou celles qui en seront directement dérivées, tant les temps des systèmes énergétiques sont longs. D'ici quarante ans (les mix de 2050), les technologies auront fortement évolué et le système socio-économique aura pu se transformer en profondeur.
Le mix idéal n'est pas un concept prescriptif dans notre pays. Toutefois, de nombreux engagements s'inscrivent exactement dans cette philosophie. Il s'agit en particulier de ceux qui déclinent les objectifs européens dans le cadre de la lutte contre les émissions de GES. Ils sont généralement bien connus (figure 3). Rappelons simplement qu'ils se structurent justement en objectifs pour 2020 (la règle des 3 × 20 du paquet Énergie-Climat) et pour 2050 (réduire d'un facteur 4 les émissions de GES).
En découle un ensemble d'objectifs (tels ceux de la Programmation pluriannuelle des investissements de production électrique), d'instruments de politique économique (subventions, taxes, tarifs d'achats...) et de règles et normes qui cadrent ces objectifs. Des simulations sont conduites par des instituts spécialisés pour illustrer des trajectoires possibles, conformes à la volonté publique (figure 4). Elles restent cependant tendancielles. La démarche suivie par les Pouvoirs publics consiste à établir un cadre économique au sein duquel les agents font leurs choix, conformément aux règles économiques de l'Union européenne. Néanmoins, cette démarche considère dans certains cas des objectifs quantitatifs (parcs éoliens et solaires en MW, contribution des biocarburants en %...) et vise à mettre en place des instruments pour amener l'économie à converger vers les valeurs spécifiées. Ces objectifs sont déclinés par source d'énergie et par secteur :

- dans tous les secteurs, diminuer tant que faire se peut la quantité totale d'énergie consommée (efficacité, sobriété, substitutions), maximiser la part des énergies domestiques et décarboner le mix ;
- dans le secteur électrique, augmenter la part des EnR et de la cogénération pour la part qui fait appel aux combustibles fossiles qui doivent décroître en volume ;
- dans les transports, baisser les consommations, accroître la part des biocarburants de 2e et à terme 3e générations, électrifier le parc et prendre en compte la question de l'hydrogène, qui revient sur le devant de la scène depuis peu ;
- dans le résidentiel-tertiaire, recourir de manière plus importante aux EnR décentralisées, isoler, rénover, mieux construire le bâtiment, piloter et réguler les consommations, et remplacer les modes de chauffage anciens par des systèmes plus performants comme les pompes à chaleur ;
- dans l'industrie, promouvoir l'efficacité, substituer les énergies les moins performantes...

Compte tenu du poids relatif de ces secteurs dans la consommation d'énergie, ce sont principalement les transports (70 % de la consommation énergétique des produits pétroliers) et le résidentiel-tertiaire qu'il convient de décarboner. Le secteur de l'électricité, qui fait l'objet d'une grande attention, possède un niveau de performance excellent, dû à la place du nucléaire et de l'hydraulique.
Au final, très peu d'études montrent que le mix du futur ne peut être vu comme un gâteau énergétique de taille donnée que les énergies primaires se partageraient ensuite. Cette vision est souvent implicite dans les débats sur les parts respectives des énergies bas carbone dans l'électricité. C'est une double erreur car, d'une part, la production d'électricité peut être d'autant plus forte qu'elle contribue à décarboner des secteurs tels que les transports ou l'industrie et, d'autre part, les synergies entre énergies décarbonées créent de la valeur lorsqu'elles sont développées conjointement.

© PhotoDisc

Le secteur des transports, qui dépend à 95 % du pétrole, est également une cible privilégiée pour accroître la part des énergies renouvelables. Le CEA travaille notamment sur les biocarburants de 2e et 3e générations. Un pilote préindustriel de production de biocarburants de 2e génération, à partir de biomasse ligno-cellulosique (résidus forestiers, déchets agricoles), est en cours de développement (projet Syndièse). Il pourrait fournir plus de 30 millions de litres de biocarburants par an.

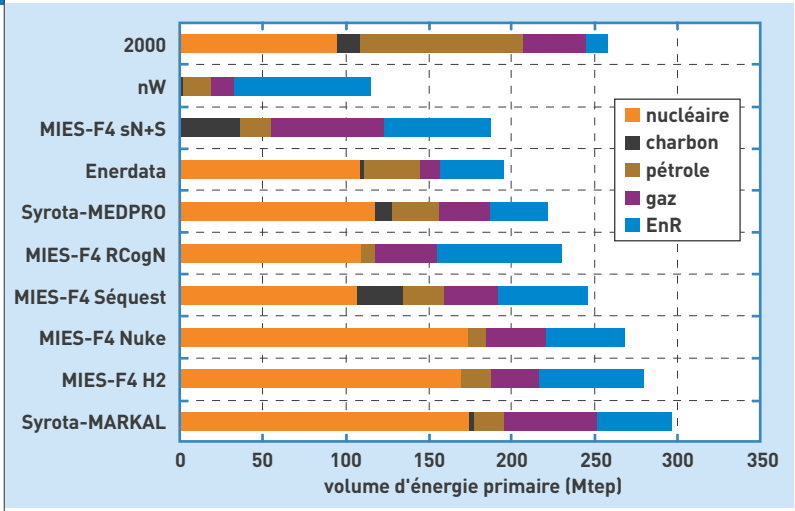


Figure 4.
Le mix énergétique primaire français en 2050 selon différents scénarios, avec un objectif de division par 4 des émissions de GES :
• 2000 : situation du mix en 2000.
• nW : scénario établi par négaWatt pour le Gouvernement en 2006, basé sur le non-renouvellement des centrales nucléaires, la sobriété et l'efficacité énergétiques, et le déploiement des EnR.
• MIES : exercice mené par Pierre Radanne pour la Mission interministérielle sur l'effet de serre (MIES) en 2004, selon cinq scénarios. MIES-F4 sN+S : sortie du nucléaire avec séquestration du gaz carbonique (CO_2) ; MIES-F4 RCogN : équilibre entre le recours au nucléaire et le développement de la cogénération et des EnR ; MIES-F4 Séquest : développement de la séquestration du CO_2 ; MIES-F4 Nuke : développement accru du nucléaire et pénétration de l'électricité dans tous les usages, y compris les transports ; MIES-F4 H2 : mise au point d'une filière hydrogène alimentée par des centrales nucléaires.
• Enerdata : dans ce scénario établi par Enerdata pour le Gouvernement en 2005, les émissions continuent de croître jusqu'en 2030 puis décroissent d'autant plus par la suite. Cette étude illustre une trajectoire post-Grenelle.
• Syrota-MEDPRO et Syrota-MARKAL : étude remise au Gouvernement en 2007 par une commission du Centre d'analyse stratégique présidée par Jean Syrota, s'appuyant sur les modèles MedPro (couplé à POLES) et Markal-Times.

La figure 4 présente les tendances traduites par divers exercices de modélisation visant au respect de l'objectif « facteur 4 » par la France en 2050[5]. Ces scénarios indiquent que des chemins assez contrastés peuvent permettre d'atteindre les buts fixés, ceci sous contrainte de la technologie disponible et des comportements des agents économiques, principalement. Encore faut-il aussi que ces scénarios soient économiquement acceptables.

Le rôle central de la R&D

Dans les conclusions de son rapport[6], rendu en février 2012, la Commission Énergies 2050 pointe le rôle de la R&D dans l'évolution du mix énergétique français. Selon cette commission, il est impératif de se donner, grâce à la R&D, des marges de manœuvre pour des technologies qui deviendront matures à partir de 2030. L'une des clés du succès réside dans la mise au point de nouvelles filières d'excellence et la préservation de celles qui sont fortes aujourd'hui. La R&D et la formation constituent deux autres clés. La R&D apparaît donc comme une voie essentielle, pour des raisons qui vont de la disponibilité opérationnelle de nouvelles technologies à l'importance stratégique, pour le pays et l'Europe, de développer en propre des technologies innovantes, porteuses de croissance et d'emplois (figure 5).

Ces préoccupations sont au cœur des recherches du CEA dans le domaine de l'énergie. Ses travaux de R&D sont en effet presque exclusivement tournés vers des technologies non fossiles, telles que l'énergie nucléaire, l'énergie solaire ou encore l'utilisation de la **biomasse** et les techniques de l'hydrogène, sans oublier le stockage de l'énergie et la gestion des réseaux.

L'action du CEA consiste ainsi à tracer la route d'un futur décarboné de façon ouverte, avec un objectif très ambitieux pour les décennies 2030-2050, voire au-delà avec la **fusion** en complément du **nucléaire de 4e génération**. Elle s'inscrit dans une vision du système énergétique global, en déployant des moyens importants

(5) Sandrine Mathy, Meike Fink et Ruben Bibas, « Quel rôle pour les scénarios Facteur 4 dans la construction de la décision publique ? », *Développement durable et territoire*, Vol. 2, n° 1, 2011. Téléchargeable à l'adresse : http://www.imaclim.centre-cired.fr/IMG/pdf/20110924-MathyFinkBibas-RoleF4ScenariosInPublicDecisionMaking.pdf.

(6) Jacques Percebois et Claude Mandil, « Rapport énergies 2050 », 2012. Téléchargeable à l'adresse suivante : http://www.strategie.gouv.fr/content/rapport-energies-2050.

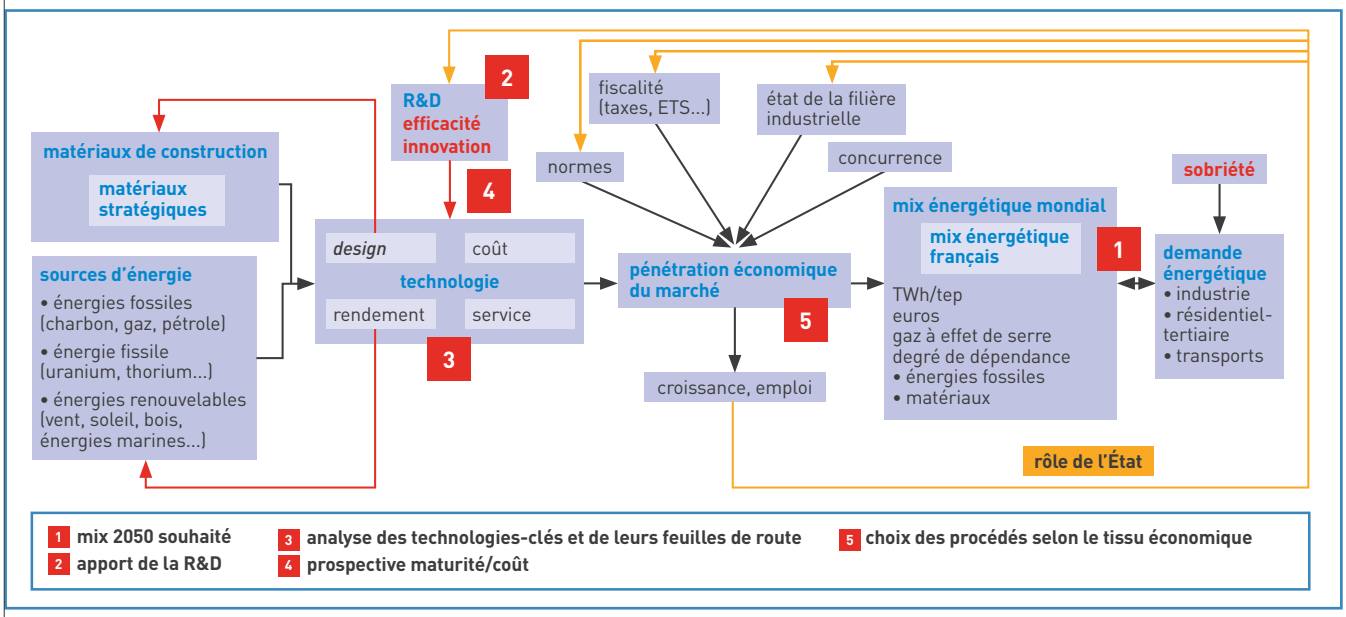


Figure 5.
Interrelations entre R&D et mix énergétiques. Ce schéma présente le rôle de la R&D dans le processus d'élaboration du mix du futur. Elle se situe à la racine des évolutions technologiques du système énergétique et compte aussi pour partie au rang des leviers dont disposent les Pouvoirs publics pour promouvoir la progression vers le mix objectif souhaité.

en soutien à la maîtrise de la demande d'énergie et à la gestion des flux et de l'information (conduite de procédés, smart grid...). Elle permet enfin de tirer avantage des synergies possibles entre les différentes énergies bas carbone, en particulier le nucléaire et les EnR : gestion de l'intermittence, optimisation des stockages *via* l'hydrogène ou les biocarburants, amélioration du cycle de vie du solaire photovoltaïque grâce à un raffinage du silicium des cellules par électricité nucléaire... Si le rôle de la R&D est largement reconnu, sa quantification demeure néanmoins l'un des grands défis de cette période. Des travaux bénéficiant de nouveaux modèles sont en cours. Ils n'ont pas encore délivré tout leur potentiel.

Une indispensable évaluation économique des choix énergétiques

La durabilité évoquée précédemment comprend un fort axe économique. Une technologie n'aura de chance de se développer que si son coût devient à terme suffisamment bas pour être accepté à tous les niveaux de la société, que ce soit directement, en minimisant les charges des ménages et des entreprises, ou de façon indirecte, en minimisant l'impact sur la balance commerciale du pays. En prenant en considération le coût de l'électricité (par exemple en MWh), il apparaît que ce dernier varie de manière importante selon le scénario de mix électrique choisi (figure 6).
L'importance de l'évaluation technico-économique a amené le CEA à créer l'Institut de technico-économie des systèmes énergétiques (I-tésé). Cet institut dédié dispose de la capacité de construire et d'évaluer des mix contrastés, dans une perspective de court et surtout de moyen et long termes. Un de ses axes prioritaires est une meilleure prise en compte du rôle de la R&D dans l'élaboration puis dans l'atteinte du jeu de mix idéaux/objectifs du pays.

Le débat national sur la transition énergétique mis en place par le Gouvernement, qui a fait suite à la première Conférence environnementale des 14 et 15 septembre 2012, a été lancé le 29 novembre 2012.

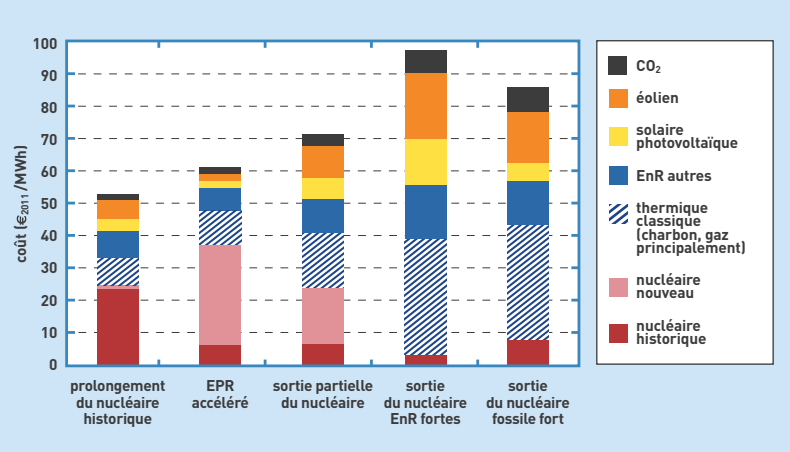


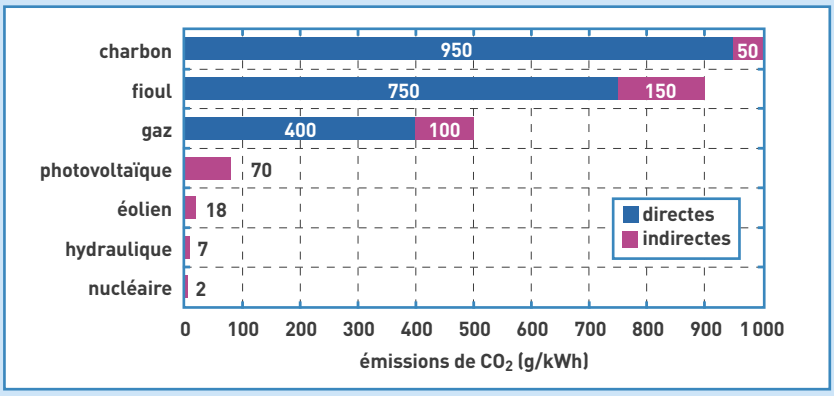
Figure 6.
Cet exemple, emprunté au rapport de la Commission Énergies 2050[6], illustre une des logiques constitutives des choix de mix par les Pouvoirs publics. Divers scénarios de mix électrique en 2030, pour un environnement économique donné, ont été évalués. Le critère pris en compte est celui du coût moyen actualisé du MWh produit. Pour le gaz carbonique (CO_2), le coût de la taxe ou d'ETS (*European Union Emissions Trading System*) s'élève à 50 euros par tonne. Le rapport entre les coûts du MWh est presque de 2 entre le choix de prolonger la durée d'exploitation du nucléaire historique et celui de développer un parc fortement constitué de technologies bas carbone, sans le nucléaire. Les choix comme la dynamique jouent un rôle central : l'arrêt rapide des réacteurs nucléaires actuels ne permet, dans ce scénario, ni de tirer avantage d'EnR compétitives, car le renouvellement a lieu trop tôt, ni de bénéficier massivement de synergies entre EnR et énergie nucléaire, cette dernière n'étant plus utilisée.

Il a été structuré en trois étapes : une phase d'information, une phase de consultation du grand public « au plus près des citoyens » qui se déroulera jusqu'en juin 2013, une phase de synthèse et d'élaboration de recommandations qui aboutira à un projet de loi de programmation à l'automne 2013. Dans le cadre de l'Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie (Ancre), les experts du CEA ont pour mission de proposer et de caractériser des scénarios sur les trajectoires possibles pour la transition énergétique.

> **Jean-Guy Devezeaux de Lavergne**
Institut de technico-économie
des systèmes énergétiques (I-tésé)
Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Saclay

Énergie électrique et émissions de CO_2

Le secteur de l'électricité est, avec les transports, l'un des grands émetteurs de gaz à effet de serre (GES) dans le monde. Les centrales à charbon sont les plus polluantes avec 1 kg de gaz carbonique (CO_2) par kWh produit, deux fois plus que le gaz, communément utilisé en cogénération. Alors que le nucléaire et les énergies renouvelables n'émettent pas de CO_2 en fonctionnement, une analyse de leur cycle de vie montre qu'ils consomment de l'énergie, principalement au cours de la phase de construction. Les émissions, dites indirectes, sont évaluées et ramenées à la production électrique fournie tout au long de la durée de vie de la centrale. En France, le secteur de l'électricité est peu carboné grâce à une production essentiellement à partir d'énergie nucléaire (à 75 % ; émission de 2 g/kWh de CO_2) et d'énergies renouvelables (à 14 % ; émission de 7 g/kWh de CO_2 pour l'hydraulique par exemple).



> **Henri Safa**
Direction scientifique
Direction de l'énergie nucléaire
CEA Centre de Saclay