

Notre futur énergétique se décide aujourd'hui

Patrick Criqui est économiste et directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS) ; il dirige l'équipe d'Économie et du développement durable et de l'énergie du laboratoire PACTE (CNRS, université de Grenoble). Il donne dans ce chapitre des éléments de prospective sur l'avenir énergétique de notre planète.

Les trois ou quatre prochaines décennies seront essentielles pour l'avenir de la planète. En effet, c'est d'ici 2050 que l'on mettra le système énergétique mondial sur une trajectoire dont les caractéristiques seront déterminantes pour l'avenir du climat à très long terme. Cela signifie que nous devons dans les quarante prochaines années effectuer une transition énergétique au plan global permettant de nous libérer de la dépendance par rapport aux énergies fossiles, et arriver à construire un mix énergétique largement décarboné, nous permettant d'espérer limiter le phéno-

mène du changement climatique.

Ou bien, nous ne parviendrons pas à cette transition énergétique mondiale et, dans ce cas, il faudra s'attendre à un climat beaucoup plus chaud qu'aujourd'hui, avec une multiplication des événements météorologiques extrêmes, et donc des impacts très importants sur les différentes sociétés humaines.

C'est ce que je voudrais décrire dans ce chapitre. Chemin faisant, j'identifierai les grandes solutions et ce que l'économie nous apprend de la nécessité de construire un

bon mix énergétique. Il faut en particulier s'inscrire dans la transition énergétique tout en recherchant l'efficacité économique, sans laquelle les politiques menées risqueraient d'aboutir à une impasse. Nous terminerons par quelques orientations possibles pour les scénarios énergétiques du futur.

Tout d'abord, avant de savoir où nous allons, essayons de regarder d'où venons en matière d'énergie et de consommation d'énergie primaire.

1 La dynamique des énergies primaires

L'évolution des cinquante dernières années de consommation des énergies primaires est représentée sur la *Figure 1*. La courbe supérieure du graphique traite le cas du pétrole. On voit que sa consommation a augmenté très rapidement dans les années 1960, jusqu'aux chocs pétroliers. Depuis, la progression du pétrole est lente mais régulière ; on ne voit pas encore aujourd'hui apparaître le phénomène de pic pétrolier dont il est beaucoup question. On a donc une progression linéaire mais très régulière de sa consommation.

La courbe de l'évolution de la consommation du charbon figure en dessous. La très mauvaise nouvelle est que si le charbon faisait jeu égal avec le pétrole en 1965, et qu'il a ensuite effectivement crû beaucoup plus lentement, nous constatons en revanche une accélération très marquée de sa consommation depuis les années 2000. Cela s'explique par la croissance éco-

nomique très rapide au cours des dix dernières années des pays émergents, en particulier ceux de l'Asie, la Chine et l'Inde, qui sont de grands pays charbonniers produisant et consommant beaucoup de ce combustible. Il est donc clair que, si nous n'y prenons pas garde, le charbon, cette énergie considérée comme l'énergie du XIX^e siècle, risque de redevenir la première énergie du XXI^e siècle.

Il ne s'agit pas d'ostraciser une énergie par rapport aux autres, mais il faut simplement rappeler qu'aujourd'hui, dans les conditions actuelles d'utilisation, le charbon entraîne des émissions de gaz à effet de serre beaucoup plus importantes que celles des autres énergies, évidemment, plus que les énergies non carbonées, mais aussi plus que le pétrole ou le gaz naturel. La consommation de cette source part d'assez bas, puis a ensuite aussi connu une croissance très régulière, légèrement plus rapide que celle du pétrole depuis les années 1980.

Examinons les courbes d'évolution des énergies décarbonées (les trois courbes inférieures de la *Figure 1*) :

- l'énergie hydraulique, qui progresse lentement mais régulièrement, représente aujourd'hui environ 6 % de l'approvisionnement énergétique mondial ;
- le nucléaire, qui augmente très rapidement dans les années 1970 avec le lancement des premiers programmes électronucléaires dans le monde, plafonne aujourd'hui, en raison à la fois de la première

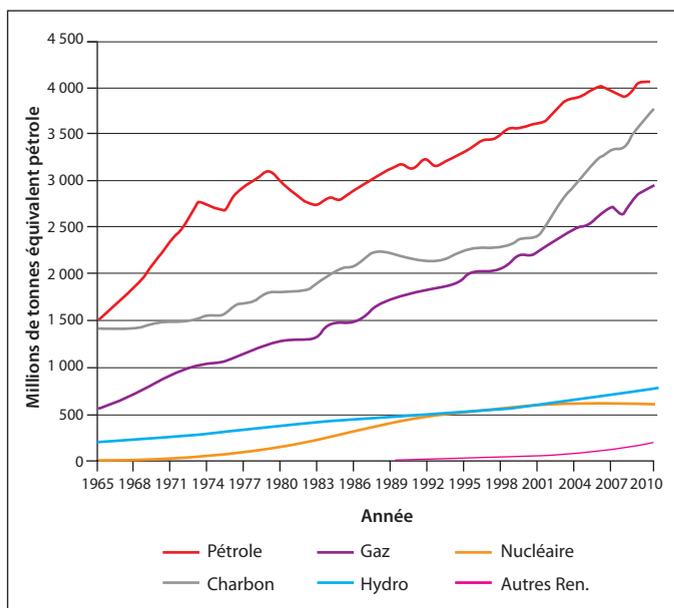


Figure 1

Consommation des énergies primaires (millions de tep), de 1965 à 2000.

Source : BP Statistical Review of World Energy 2012

crise de l'énergie nucléaire qui a entraîné un ralentissement des commandes de centrales à partir des années 1990 et aussi aujourd'hui en raison des événements qui ont eu lieu à Fukushima. L'avenir du nucléaire reste donc très incertain ;

– enfin, sous la rubrique « autres renouvelables » sont rassemblées toutes les énergies dont on parle beaucoup aujourd'hui : l'énergie éolienne, l'énergie solaire, les biocarburants. Cette catégorie ne prend pas en compte la biomasse traditionnelle parce que, étant non commerciale, elle est difficile à comptabiliser. Quand on considère les nouvelles énergies renouvelables, on s'aperçoit qu'il y a eu certes une forte progression dans les dix dernières années, mais qu'elles ne représentent encore aujourd'hui que 1,7 % de l'approvisionnement énergétique total mondial. Si nous souhaitons augmenter

significativement la part de ces énergies dans le bilan énergétique mondial, il va donc falloir fournir beaucoup d'efforts.

2 L'évolution climatique à l'horizon 2050

La **Figure 2** montre que tout se joue avant 2050. Ce graphique est établi à partir des tableaux du quatrième rapport du GIEC (Groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat), qui est la meilleure instance scientifique pour l'étude de ces problèmes. Il montre la relation entre l'augmentation de température attendue sur le long terme et les émissions de gaz à effet de serre, plus précisément le point de passage en 2050.

On voit que si l'on double les émissions de gaz à effet de serre en 2050 par rapport à 2000, il faudra s'attendre à une augmentation de température à long terme de six degrés. Si l'augmentation des émissions

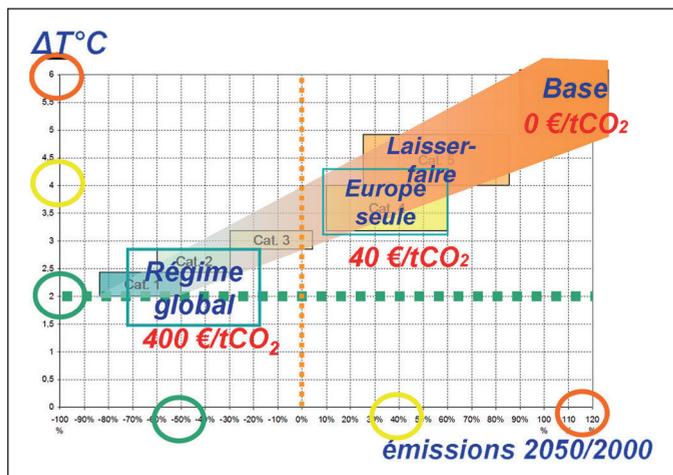


Figure 2

Relation entre les émissions prévues en 2050 et les variations de températures par rapport à 2000, selon une étude du GIEC.

Source : P. Criqui, projet FP7 SECURE, d'après le Quatrième rapport d'évaluation du GIEC

est autour de 40-50 %, on peut prévoir une augmentation de quatre degré, et, pour tenir l'objectif climatique de 2 °C actuellement discuté au plan international, il faudrait réduire les émissions de gaz à effet de serre d'au moins 50 % en 2050 par rapport à 2000.

On constate donc l'ampleur de la tâche car lorsque l'on explore avec des modèles économiques (même s'ils peuvent se tromper, ils permettent néanmoins de construire des images du futur relativement cohérentes), les scénarios sans politique de réduction d'émission des gaz à effet de serre, on se retrouve précisément dans le cas du doublement des émissions.

Afin de limiter l'augmentation de température à 2 °C, il faudrait mettre en œuvre le scénario d'un régime climatique global, c'est-à-dire un dispositif international dans lequel les grands pays du monde se mettraient tous d'accord pour réduire significativement leurs émissions de gaz à effet de serre. Dans ce scénario, il faut réduire les émissions

mondiales de 50 %, c'est-à-dire les diviser par deux en 2050 par rapport à 2000 ; mais cela signifie que si l'on veut laisser un peu de place à la croissance des pays émergents et des pays en développement, il faut fournir beaucoup plus d'efforts chez nous, dans les pays industrialisés qui aujourd'hui consomment davantage d'énergie, et donc émettent davantage. L'objectif français du facteur 4, formulé en 2003, qui conduirait donc à diviser par quatre les émissions en 2050 est donc en parfaite cohérence avec cet objectif mondial d'un facteur deux.

Pour modifier les comportements et les trajectoires, beaucoup d'actions sont à mettre en œuvre : des interventions en matière de R&D, des actions de formation, d'éducation, des normes à introduire... Mais surtout, du point de vue économique, il faut, comme le disait Al Gore il y a quelques années, « donner un prix au carbone » ; c'est la condition nécessaire (mais pas forcément suffisante) des politiques climatiques vigoureuses et efficaces. Dans le scénario du laisser-faire, ce prix est nul ; dans le scénario où chacun fait ce qu'il peut, mais sans véritable coordination mondiale (le *Muddling Through*) c'est 40 € par tonne de CO₂ en point d'arrivée à 2050. Même si cette somme est peu élevée, cela peut déjà avoir un impact bénéfique significatif sur la mise en œuvre de solutions bas carbone.

Mais si l'on veut aller beaucoup plus loin et respecter la contrainte 2 °C, il faut un affichage politique plus

fort, et arriver à des prix de 400 € la tonne de CO₂ en 2050 (*Figure 2*). Ce coût représente l'équivalent d'un surcoût de un euro par litre d'essence. Est-ce démesuré alors que c'est probablement la condition de cette transition et de cette modification profonde des systèmes énergétiques d'ici 2050 ? Laissons à chacun le soin de juger, sachant que sur dix ans, depuis le début des années 2000, le prix du litre d'essence a déjà augmenté de cinquante centimes !

Il nous faut en effet en permanence avoir en tête cette question des signaux à introduire dans les systèmes économiques, car nous ne sommes pas dans des économies planifiées – qu'on le regrette ou qu'on s'en félicite – et il faut donc bien donner des signaux aux acteurs économiques décentralisés.

3 Des orientations possibles pour les scénarios énergétiques du futur

Ces choix politiques contrastés se traduisent par deux images contrastées du monde à l'horizon 2050 (*Figure 3*) : sur la *Figure 3A*, on voit le monde probable si l'on ne fait rien ou si on laisse faire, compte tenu des diverses contraintes qui sont évoquées dans les autres chapitres de cet ouvrage sur le développement des différentes sources d'énergie. La plupart des prospectives énergétiques de long terme convergent d'ailleurs vers ce type d'image, dans le cas du laisser-faire.

Pour le pétrole (en rouge dans la *Figure 3*), la production augmente encore un peu d'ici 2050, mais en tendant vers un plateau, qui suppose déjà une mobilisation assez importante de pétrole non conventionnel. La même chose est observée pour le gaz naturel, pour lequel la consommation tend vers un plateau aux alentours de quatre milliards de tonnes équivalent pétrole à partir de 2040.

En haut de chaque barre est représenté l'apport des nouvelles énergies renouvelables évoquées précédemment. Nous pouvons voir que leur contribution augmente significativement, de même pour la biomasse qui est représentée en vert. Une augmentation du nucléaire (en jaune) d'un facteur deux à trois est prévue dans le cadre de ce scénario.

Au milieu, en brun, est représentée la part du charbon qui boucle le bilan énergétique mondial, et l'on constate dans ce scénario un grand retour. Nos collègues du climat considèrent ce scénario énergétique probable, qui va doubler les émissions de gaz à effet de serre, comme un scénario quasi-catastrophe qui entraînera une augmentation de la température de la Terre de quatre degrés dès la fin de ce siècle, et probablement beaucoup plus au-delà si l'on continue sur cette voie.

Par opposition, le scénario vertueux (*Figure 3B*) est un scénario dans lequel on consommerait moins d'énergie. C'est le message toujours porté par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), pour

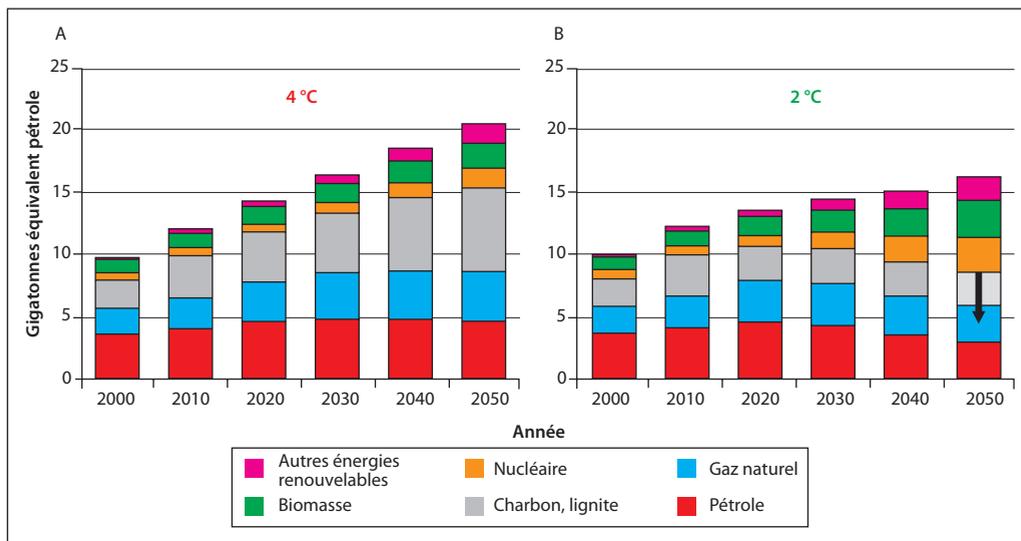


Figure 3

Consommation mondiale d'énergie primaire.

A. Avec une population et un PIB respectivement multipliés par 1,5 et par 4, le « laisser-faire » conduit au grand retour du charbon et au doublement des émissions, avec pour conséquence une augmentation de la température de 3-4 °C dès 2100.

B. Une politique climatique responsable avec moins de fossiles et un fort développement de la capture et séquestration du CO₂ (CSC) limiterait la consommation et les émissions totales.

Source : Laboratoire EDDEN, Projet FP7 SECURE

qui l'une des premières actions à entreprendre pour avoir un système énergétique durable et contrôler le changement climatique, c'est d'abord de consommer moins d'énergie.

Dans ce modèle, on se retrouve en 2050 avec un mix énergétique mondial (ou bouquet énergétique) très diversifié, et finalement assez équilibré. Comme dans ce bouquet on consomme moins de pétrole, il n'y a plus de problème de ressources, car la limite au pétrole est du côté de la demande et non pas du côté de la rareté de l'offre. On consomme aussi un peu moins de gaz naturel, mais celui-ci reste plus favorable, relativement aux autres fossiles, en termes d'émissions. On consomme surtout beaucoup moins de charbon que dans le premier scénario, et l'on a davantage de nucléaire, de biomasse, d'énergies renouvelables, qui correspondent ensemble, dans ce scénario, à environ

50 % de l'approvisionnement énergétique mondial.

Mais comment faire pour diviser par deux les émissions avec une consommation d'énergies fossiles en 2050 qui sera malgré tout – du fait de l'accroissement de la population – semblable à celle d'aujourd'hui ?

Pour réussir à limiter l'augmentation de la température aux deux degrés, il faudrait en plus mettre en œuvre de manière très massive des technologies de capture et de séquestration du carbone. On sait que dans ce domaine, comme dans tous les autres, cela est difficile à mettre en place. En effet, si la capture et séquestration du carbone ne pose pas de problèmes scientifiques et techniques majeurs, nous devons hélas constater qu'aujourd'hui, la plupart des projets sont pratiquement à l'arrêt et qu'il existe encore peu de développements industriels dans ce domaine, ce qui est très préoccupant.

4 Quelles solutions pour limiter l'augmentation de température à 2 °C ?

Les quatre grandes options pour limiter l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre sont donc :

- la sobriété et l'efficacité énergétiques ;
- les énergies renouvelables ;
- l'énergie nucléaire ;
- la capture et stockage du CO₂.

À ces options, on pourrait ajouter encore :

- la substitution du charbon par le gaz naturel. L'impact des gaz de schiste aux États-Unis sur l'évolution des émissions de gaz à effet de serre est sans doute positif, mais encore faudrait-il prendre en compte les émissions fugitives lors de la production du gaz de schiste qu'il faudrait absolument éliminer ;
- la gestion des stocks de carbone dans les forêts, dans les sols, est une autre option à prendre en compte, mais sa mesure et sa gestion restent difficiles ;
- la géo-ingénierie ? Le point d'interrogation est ici de mise car allons-nous accepter de jouer avec les grands cycles géochimiques et les grands cycles radiatifs à l'échelle de la planète ? C'est un jeu qui pourrait être dangereux, mais des scientifiques comme James Hansen aux États-Unis, qui sont les plus préoccupés par le changement climatique, sont prêts à le faire. Les solutions de géo-ingénierie sont un choix planétaire qui doit

être sérieusement et rigoureusement étudié.

Les « solutions-miracle ». On a beaucoup cherché, sans succès, de nouvelles sources d'énergie primaire. On évoque aujourd'hui des sources primaires d'hydrogène, ce qui serait une réelle nouveauté, mais pour l'instant la quête n'est pas terminée !

5 Le coût de la transition énergétique

Les coûts des nouvelles technologies de l'énergie ne peuvent, sur le plan économique, être analysés de manière statique. Les études économiques sur ces sujets prennent en compte le concept de « courbe d'apprentissage » (*Figure 4*), qui vaut d'ailleurs dans le domaine de l'énergie, mais aussi dans d'autres domaines. Ces taux établissent une relation entre le développement d'une technologie et la baisse de son coût.

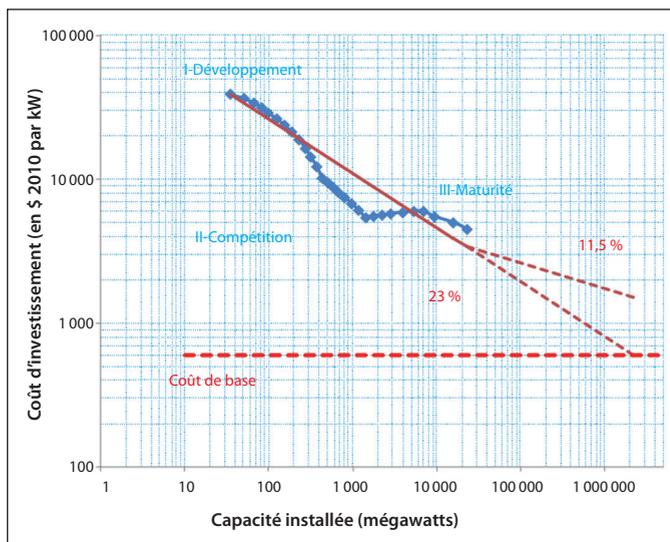
Comment se calcule-t-il ? On connaît historiquement l'ordre de grandeur des effets de l'apprentissage, et l'on observe généralement 10 à 30 % de réduction des coûts pour chaque doublement des unités produites ou des capacités à installer. On peut voir sur la *Figure 4* une assez bonne vérification de ce calcul pour l'exemple du photovoltaïque, pour lequel on mesure un taux d'apprentissage de 23 %.

De 2000 à 2008, il y a eu un ralentissement dans la baisse des coûts, du fait en particulier de l'augmentation du prix des matières premières, mais on a depuis des gains

Figure 4

Courbe d'apprentissage des nouvelles technologies de l'énergie : exemple du photovoltaïque.
En rouge figurent les taux d'apprentissage.

Source : Laboratoire EDDEN, base de données TECHPOL



très importants, car de très grosses capacités photovoltaïques ont été construites en Chine. En effet, l'essentiel du photovoltaïque, aujourd'hui installé en Europe, non seulement en France, mais aussi en Allemagne (bien que l'on dise l'industrie photovoltaïque allemande en meilleur état que celle de la France), résulte essentiellement d'importations de panneaux photovoltaïques de Chine. Comme la demande a été ralentie suite à la crise économique, il y a maintenant des surcapacités, et les prix ont donc beaucoup baissé. Il faudrait donc faire le tri dans les baisses récentes du photovoltaïque, entre celles liées aux réels progrès techniques et celles liées aux effets de compétition industrielle.

6 Le coût du développement du bouquet énergétique

La Figure 5 présente des évaluations des coûts de production de l'énergie à l'horizon

2025, à partir d'hypothèses sur les évolutions du progrès technologique et le prix des énergies primaires. On pourrait avoir un nucléaire aux alentours de 70 € par mégawatt-heure, un charbon sans séquestration et en prenant en compte un prix du CO₂ de 50 €/tCO₂ aux alentours de 90 € par mégawatt-heure. Le gaz naturel serait également aux alentours de 90 € le mégawatt-heure. Mais le prix du gaz naturel en Europe dépendra de l'option qui sera faite concernant l'exploitation du gaz de schiste. Il peut baisser comme c'est actuellement le cas aux États-Unis, même en sachant que le prix américain est actuellement certainement sous-évalué, car le coût de production est probablement de sept ou huit dollars par million de BTU¹.

À droite du graphique, apparaissent les énergies renouvelables. L'éolien devrait

1. BTU, *British thermal unit*, est une unité d'énergie anglo-saxonne.

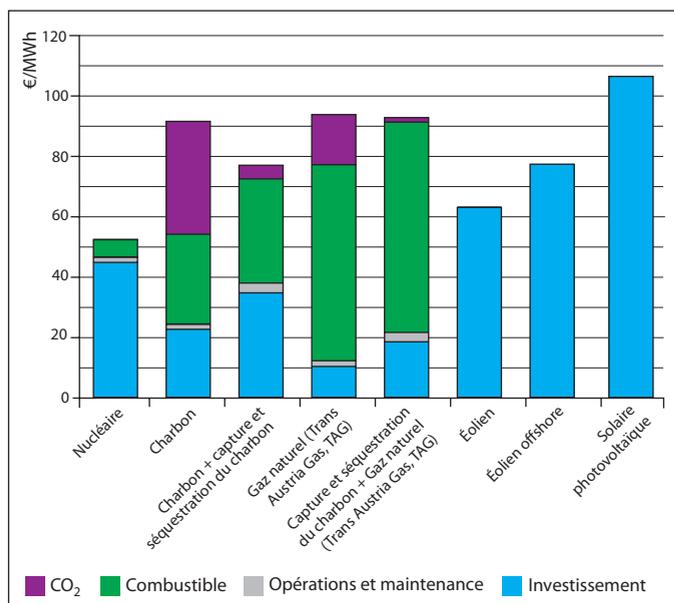


Figure 5

Coûts de production prévus en 2025.

Source : Base de données TECHPOL (charbon à 150 \$/t, gaz à 15 \$/Mbtu, CO₂ à 50 €/t)

progresser et avoir un coût de 60 € par mégawatt-heure en 2025 en off-shore, 80 € en off-shore, tandis que le photovoltaïque serait autour de 130 € dans des conditions moyennes françaises. Néanmoins, il faut noter à ce stade que, quelle que soit l'évolution du coût de ces énergies, il s'agit de sources intermittentes et aléatoires. Il faut donc gérer ce problème et prendre en compte, dans la modélisation, le coût de l'ajustement de l'offre et de la demande. Cette prise en compte a été réalisée dans le cadre de scénarios dans lesquels on aurait en Europe une forte proportion d'énergie intermittente et aléatoire, éolien et solaire. Quatre types de solutions sont envisagés pour une intégration plus massive des renouvelables intermittentes dans les systèmes électriques.

1. L'installation de productions de secours (*backup*), en utilisant des turbines à gaz ou

même des centrales à charbon qui ne tourneraient que pendant une petite partie de l'année. Cela représente donc des investissements peut-être difficiles à rentabiliser, qui auront dans tous les cas un coût à prendre en compte.

2. La mise en place de capacités d'interconnexions entre des grandes plateformes de production d'énergie intermittente : les « supergrids ». De nombreuses études ont été menées en Europe sur ces sujets (Figure 6). Idéalement, un supergrid pourrait faire la jonction entre une plateforme solaire en Europe du Sud et une en Afrique du Nord, et une plaque éolienne dans la mer du Nord. Les perspectives sont actuellement marquées d'incertitudes. Siemens, qui était l'un des protagonistes, s'est retiré du solaire et en particulier du projet Desertec qui consistait à produire de l'électricité en Afrique du Nord pour

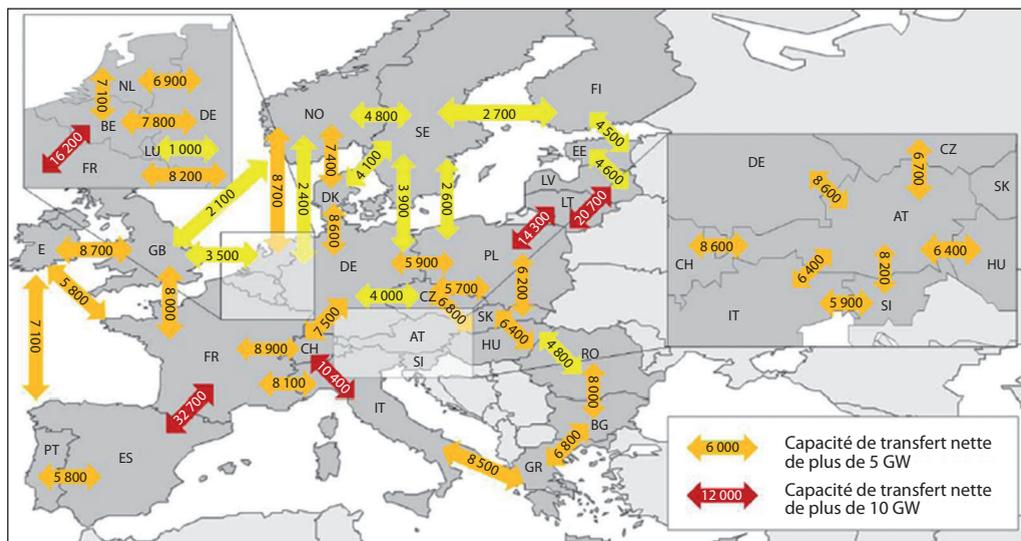


Figure 6

Prévisions des capacités d'interconnexions pour un approvisionnement électrique durable.

Source : DESERTEC Foundation
<http://desertec.org/fileadmin/downloads/press/DESERTEC-MAP.zip>

alimenter l'Europe. Mais il semblerait que la Chine propose aujourd'hui à l'Allemagne d'acheminer de l'électricité d'origine éolienne en provenance de Mongolie, sur six mille kilomètres, avec des lignes très haute tension, et même ultra-haute tension, à un coût de l'ordre de 110 € le mégawatt-heure. Ainsi les supergrids n'ont peut-être pas fini de nous surprendre !

3. La mise en place de « smartgrids », devrait permettre d'assurer l'adéquation offre/demande en énergie au niveau local, pour les différences sources qui seraient mobilisées dans des boucles locales (Figure 7).

Ces smartgrids peuvent permettre : dans un premier temps la mise en concurrence des distributeurs, le relevé à distance et le comptage intelligent ; à un deuxième niveau, associés à une box-énergie, l'effacement diffus de certains usages au moment des pointes pour assurer l'équilibrage et la

sécurité du réseau ; enfin, l'optimisation des systèmes locaux intégrant nouvelles sources renouvelables intermittentes et nouveaux usages tels que le véhicule électrique.

4. Enfin, la question du stockage de l'énergie est très liée au développement des énergies intermittentes, et quatre grandes options sont envisagées aujourd'hui : l'air comprimé, l'hydrogène, les batteries stationnaires et les STEP (Station de Transfert d'Énergie par Pompage).

Au-delà de la solution des capacités de réserve, toujours coûteuses, le concept dit 3S – supergrids, smartgrids et stockage – peut donc bénéficier des progrès majeurs de la convergence des technologies de l'information et de l'énergie dans les systèmes électriques, et l'électricité pourrait ainsi constituer l'un des vecteurs privilégiés de la décarbonisation des systèmes énergétiques.

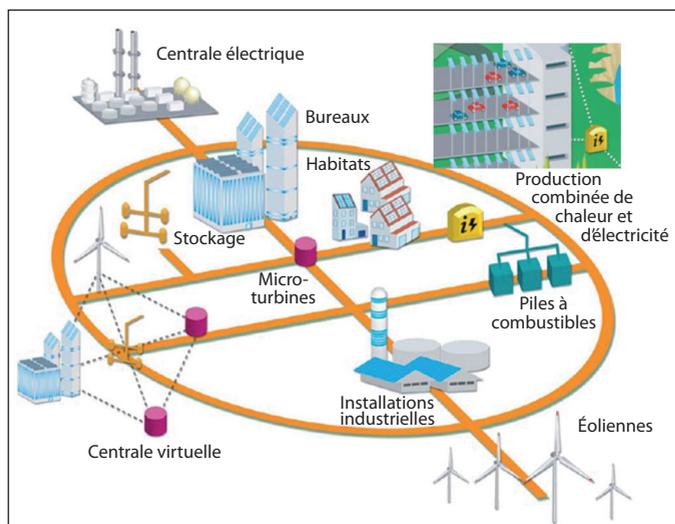


Figure 7

Plateforme technologique smartgrids. Un système dont le fonctionnement serait réparti entre les générateurs centraux et distribués. Le contrôle des générateurs distribués pourrait être regroupé pour former des micro-réseaux ou des centrales électriques virtuelles, afin de faciliter l'intégration à la fois dans le système physique et sur le marché.

Source : European Technology Platform Smart grid.
http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/smartgrids_en.pdf, page 18

7 Les biogaz et bio-liquides : alternative ou complément ?

Dans ce contexte, les biogaz et les bio-liquides constituent-ils une alternative aux solutions plutôt électriques ? Les pétroliers ont depuis toujours coutume de dire que « le grand avantage du pétrole est d'être un liquide ». C'est une évidence, mais les caractéristiques propres à un liquide – le stockage et le transport faciles – sont effectivement de gros avantages, et ce n'est

pas pour rien que le baril est l'une des unités énergétiques les plus utilisées.

Il y a donc de bonnes chances de penser que les vecteurs liquides et gazeux, facilement stockables, conserveront un rôle dans les systèmes énergétiques du XXI^e siècle, et cela, d'autant plus qu'ils seront détachés des sources fossiles et qu'ils résulteront plutôt d'une valorisation massive de la biomasse... Et la chimie jouera un grand rôle dans ce domaine.

La nécessité d'un bouquet énergétique pour le futur

Il faut donc vraiment prendre conscience que l'avenir du climat se joue dans les décisions et les actions entreprises d'ici 2050. La transition énergétique doit permettre de passer en très peu de temps, à l'échelle des sociétés humaines, d'un scénario de laisser-faire, probable mais impliquant de très importants risques climatiques,

vers le scénario d'un futur énergétique souhaitable, caractérisé par le désengagement par rapport aux énergies fossiles.

Par ailleurs, la dynamique des coûts des énergies dépend de deux facteurs contraires : des effets d'apprentissage mais aussi des coûts de développement qui sont en général croissants au fur et à mesure que les meilleurs potentiels sont utilisés. L'analyse économique nous montre alors que, de manière très générale, les solutions permettant d'avoir un mix équilibré coûtent moins cher que les solutions trop orientées vers une seule option dont on atteindrait rapidement les limites.

Dans ce contexte, les choix stratégiques au niveau mondial, mais aussi au niveau français, porteront donc sur les priorités qui devront être accordées à la sobriété énergétique, à l'électricité décarbonée et à un mix de vecteurs plus diversifiés s'appuyant en particulier sur les bioénergies. Puis, en fonction des options stratégiques retenues, il faudra veiller à développer un mix de solutions coût-efficace et répondant aux objectifs multiples des politiques énergétiques.