

(réseau de distribution d'électricité « intelligent » qui utilise les technologies de l'information pour optimiser les relations entre l'offre et la demande) est de permettre une augmentation de la part des renouvelables intermittentes au-delà des 30-40 % de contribution aux besoins en électricité. La piste des supergrids, qui est notamment très en vogue en Allemagne, repose quant à elle sur l'idée que l'éolien offshore de la mer du Nord pourrait se compléter avec le solaire du Sahara et du Sud de l'Europe autour d'une plaque européenne renforcée du point de vue des interconnexions.

Daniel: Il existe une quatrième option, qui consiste à compenser avec du gaz, et qui est pour l'instant la seule véritablement utilisée. Ainsi l'Espagne, qui a produit 21 % de son électricité avec de l'éolien en 2010, a compensé avec des centrales au gaz.

Michel: Cette solution est imposée par des contraintes, notamment technologiques, de gestion du réseau électrique. Des projets de stockage permettant d'absorber les pointes de consommation locale émergent, dont il faudra mesurer la viabilité technique et économique, mais je ne connais pas à l'heure actuelle de projet d'envergure dans ce domaine qui pourrait assurer le stockage massif à grande échelle.

On voit bien qu'une très forte activité se développe autour des renouvelables, avec une abondance de projets dont certains vont s'imposer et d'autres disparaître. J'ai le sentiment que dans les renouvelables, le progrès viendra également d'innovations privées, plus spontanées et plus disséminées que la recherche des grands organismes. Il est également probable que le marché influencera le développement des renouvelables, d'autant plus qu'il est à portée de PME innovantes.

Patrick: Effectivement, l'innovation dans le domaine des renouvelables ne suit pas du tout le même processus que dans l'industrie nucléaire.

Isabelle: En bref, il ne vous semble donc pas possible de prévoir le développement des renouvelables comme réponse aux besoins énergétiques?

Daniel: Oui, pour l'instant on est dans un modèle qui implique de diminuer les émissions de CO₂ tout en augmentant la production d'énergie, et à l'intérieur de ce cadre, c'est très chaotique.

Michel: Je crois que le développement des renouvelables ne changera pas fondamentalement les grands équilibres qui ont été décrits précédemment, ou alors dans un contexte socio-économique très différent ou beaucoup plus lointain.

Sortir du nucléaire : un choix politique ?

Isabelle: Peut-on revenir un moment sur le point de vue qui consiste à considérer que « sortir du nucléaire » est une partie de la solution des problèmes énergétiques et environnementaux. De nombreux pays riverains européens ont fait ce choix politique. Bien que 75 % de notre électricité soit d'origine nucléaire, est-ce que la France pourrait se passer complètement du nucléaire?

Daniel: Oui, bien entendu. Mais qu'est-ce que l'on met à la place et combien ça coûte?

Isabelle: Justement, y a-t-il des réponses à ces questions?

Patrick: Raisonnablement oui. On peut tout à fait imaginer que cette sortie se fasse en douceur, en décidant de ne plus commander de nouvelles centrales. Entre 2020 et 2030, un premier tiers des centrales actuelles, dont l'arrêt est programmé durant cette décennie, serait fermé sans être renouvelé. Il faudrait pour cela accepter que le consommateur français paye son électricité plus chère: le prix du kWh payé par les ménages est aujourd'hui près de deux fois plus élevé en Allemagne qu'en France. Ce à quoi il faut ajouter la très probable augmentation des émissions de CO₂. Si l'on ignorait le problème des émissions de CO₂, il suffirait d'accepter une augmentation de 25 à 30 % du prix de l'électricité. Mais si l'on conserve la contrainte CO₂, il faudra aussi payer le prix des quotas CO₂ ou d'une taxe et cela coûtera beaucoup plus cher.

Isabelle: Les partisans d'une sortie du nucléaire « en douceur » pensent qu'il est possible que cela se fasse en remplaçant chaque réacteur mis à l'arrêt par un dispositif d'énergie

renouvelable de manière à respecter la contrainte CO₂. Qu'en pensez-vous? Et, pour revenir sur la notion de coût de l'électricité, si au lieu de les arrêter, on remplace ces centrales, le coût sera répercuté sur nos factures d'électricité, qui par ailleurs augmenteront inévitablement dans les années à venir du fait du renforcement de la sûreté des réacteurs en service.

Michel: Il faut préciser que le nucléaire peut assurer une fraction importante de la production électrique de base, comme c'est le cas en France, ce qui n'est pas le cas de l'éolien qui doit être complété par d'autres sources ou se voir adjoint des moyens de stockage importants. Il faut donc, pour raisonner en termes de prix, développer une image globale de la production d'énergie tenant compte du cycle complet des installations de production.

Patrick: J'ai rassemblé quelques chiffres de coûts de production d'électricité, issus d'estimations propres de mon laboratoire et d'un rapport anglais (Renewable Energy Report) sorti en mai 2011; les chiffres que j'ai gardés sont, pour 2025:

- nucléaire: 60 euros par MWh (mégawattheure) avec de nouvelles centrales, donc beaucoup plus en effet que les 42 euros par MWh actuels, qui correspondent à un prix calculé avec des centrales amorties;
- éolien onshore: 60 à 70 euros par MWh, et il faut prévoir derrière les capacités de production modulables en appoint, le backup, que l'on estime parfois à 30 euros par MWh;
- charbon-gaz: 80 euros par MWh (avec des hypothèses élevées mais raisonnables sur le prix des combustibles)¹;
- photovoltaïque: 150 euros par MWh, et comme pour l'éolien, il faut prévoir le coût des solutions d'appoint ou de stockage et d'adaptation des réseaux, que l'on ne peut chiffrer puisque ces solutions n'existent pas.

Globalement, on voit que le nucléaire reste une solution intéressante d'un strict point de vue économique. Évidemment, ce sont des chiffres et des conditions a minima. Mais ce sont des

ordres de grandeur qui m'apparaissent raisonnables ou du moins assez robustes car on les retrouve dans différentes sources.

Isabelle: Ces chiffres montrent que le nucléaire et l'éolien ont les mêmes coûts de production d'électricité. L'éolien devient donc aussi intéressant que le nucléaire.

Daniel: Oui, si l'on ne tient pas compte de son intermittence.

Patrick: Effectivement, d'une part l'intermittence de l'éolien est un inconvénient et d'autre part, ces chiffres supposent une poursuite du changement technique pour les nouvelles technologies. Les questions d'économie du changement technique sont complexes car il y a deux effets inverses à prendre en compte:

1) plus on fait, plus on sait faire, moins ça coûte cher – ce sont les effets d'apprentissage (il y a notamment de belles courbes d'apprentissage du photovoltaïque, de l'éolien, etc.);

2) pour l'éolien comme pour le solaire, il est évident que l'on va d'abord équiper les sites les plus favorables, où les surfaces sont disponibles et où les ressources sont les meilleures. Puis, à mesure que l'on va monter en puissance, on va devoir chercher des sites moins favorables, et donc plus chers.

Par conséquent, l'effet d'échelle et d'apprentissage est contrebalancé par un effet d'épuisement des potentiels.

Isabelle: Le problème de l'intermittence de l'éolien et du photovoltaïque n'est finalement qu'un problème de stockage de ces énergies. À première vue, cela ne me semble pas moins irréalisable que de produire de l'électricité à partir de la fusion nucléaire. Donc, je reviens à la question que je posais précédemment: pourquoi n'en fait-on pas une priorité de recherche?

Patrick: Sans doute parce que cette question ne s'est pas posée avec une intensité suffisante jusqu'à aujourd'hui... mais les choses sont en train de changer.

Daniel: Il ne faut pas tout attendre de la recherche, et il y a des impossibilités physiques incontournables: stocker de grandes quantités d'énergie demandera toujours de grands volumes et de grandes quantités de matière. Ce stockage sera donc forcément cher. Son prix est à ajouter au coût de production de

1. Dans l'hypothèse où une taxe carbone voit le jour dans l'avenir, sur la base de 50 euros par tonne de CO₂ en 2025, il faudrait ajouter environ 40 euros par MWh au charbon, soit: $80 + 40 = 120$ euros par MWh. Pour le gaz, dont les émissions de CO₂ par kWh sont deux fois plus faibles que celles du charbon, on obtient: $80 + 20 = 100$ euros par MWh.

l'électricité qui est déjà important avec les énergies intermittentes. Ceci dit, la recherche sur le stockage d'énergie sur des temps courts (quelques heures) est très active. Les solutions testées sont bien adaptées au solaire thermodynamique, et le problème est surtout technologique pour réduire les coûts.

Michel : Le développement de stockages plus modestes prend tout son sens de façon locale ou régionale, ou à certains moments de l'année pour absorber les pointes de consommation et se rendre moins dépendant du réseau national. En revanche, des stockages qui permettraient de rendre quasi continue une production d'électricité intermittente majoritairement éolienne et/ou photovoltaïque pour un pays comme la France – et a fortiori pour l'Europe – paraissent hors de proportion.

Isabelle : En attendant de trouver une solution au problème de stockage des renouvelables, on a donc le choix entre : de l'électricité d'origine nucléaire, relativement bon marché et à volonté ; de l'électricité d'origine fossile, à volonté – pour le moment en tout cas ! – mais plus chère ; réduire sa consommation d'électricité, ce qui implique des changements de comportements.

Sylvestre : Je ne suis pas économiste, mais j'ai quelques remarques à faire sur ce qui vient d'être dit : sur le calendrier envisagé, les coûts de production d'électricité donnés ont en réalité une validité relativement courte. Il me semble totalement fou de croire que l'on puisse faire un comparatif des coûts de production des différentes énergies pour 2070 ou 2080. Or l'une des considérations qui conduit à l'option de conserver – voire de développer – le nucléaire, c'est l'évolution à très long terme des ressources fossiles en termes de quantités disponibles et en termes de coûts : bien évidemment, moins il y en aura, plus elles seront chères. Les coûts donnés précédemment ne sont donc pas valables pour des choix de plus long terme que 20 ou 30 ans.

Ensuite, toutes les technologies ont des potentiels variables d'enrichissement ou d'économie en fonction de ce que l'on prend comme sous-ensemble : par exemple, le vent ne va pas augmenter mais, comme Patrick l'a expliqué, une fois que l'on aura équipé les endroits où les éoliennes tournent 35 % du temps, on va équiper les endroits où elles tournent à 30 %, etc.,

et le prix va augmenter. Le potentiel de réduction des coûts ou d'augmentation des rendements est lui aussi difficile à prévoir. Les industriels de l'éolien proposent désormais des éoliennes terrestres de 2,5 MW qui fonctionnent avec des vitesses de vents plus faibles qu'avant et le solaire est encore très loin de ses possibilités théoriques, donc il peut beaucoup progresser. Mais le nucléaire possède lui aussi un potentiel de réduction des coûts.

Surtout, je ne suis pas convaincu que ce soit pertinent de faire des calculs sur le kWh produit : d'une part parce que les centrales nucléaires produisent des quantités énormes de kWh et qu'il faut les comparer non au prix du kWh unitaire d'une éolienne ou d'un mètre carré de photovoltaïque, mais à des ensembles de taille comparable en volume de production pour que cela ait un sens ; et d'autre part car il faut prendre en considération la totalité du système, de l'extraction de l'uranium à l'enfouissement des *déchets* et au *démantèlement* des centrales.

Patrick : Juste une précision, mes calculs tiennent compte du démantèlement, pour 50 % du coût initial. Cependant le calcul économique conduit à minorer les dépenses à engager dans un futur lointain : c'est la procédure dite de l'actualisation, contestable mais rigoureuse en théorie.

Sylvestre : D'accord, mais ce que je veux dire par là, c'est que pour le nucléaire aussi il y a des potentiels de coûts supplémentaires ou d'économie. Par exemple, le coût du combustible : le parc actuel a essentiellement fonctionné avec du combustible *enrichi* à l'usine Georges Besse I avec un coût de production élevé puisqu'il a fallu y consacrer 15 TWh par an, soit les deux tiers de la production annuelle des 4 réacteurs de la centrale de Tricastin – ce qui faisait de Georges Besse I le premier client d'EDF ! Le nouveau dispositif d'*enrichissement* par centrifugation, Georges Besse II, entré en exploitation en 2010 – en parallèle de Georges Besse I, qu'il va progressivement supplanter –, n'utilise que 15 % de la puissance d'un réacteur nucléaire. Si on calcule le gain sur un demi-siècle ou plus, on se rend compte que le coût du combustible peut baisser de manière significative. Mais il existe également de nombreux autres paramètres que l'on peut ainsi passer à la moulinette « coûts supplémentaires/économie » : la maintenance des centrales,

les durées de chargement, etc. Tous ces paramètres peuvent faire varier dans des proportions non négligeables les coûts de production d'électricité. Par conséquent, les 60 euros par MWh annoncés plus haut peuvent être majorés ou minorés de 20 à 30 %, y compris en fonction de décisions politiques. Par ailleurs, il ne faut pas oublier que les accidents rendent tous ces calculs caducs : Fukushima coûtera des dizaines de milliards d'euros au bas mot.

Enfin, les calculs de ce type ne sont pas valables dans tous les pays. Par exemple, pour des petits pays qui achètent une centrale nucléaire clé en main à un industriel, qui n'ont dépensé aucun argent public en soutien à la R&D, qui se fournissent en combustibles auprès d'un fournisseur étranger, et qui éventuellement se débarrassent du combustible utilisé via la filière russe existante, les coûts sont très différents, très bas et totalement faussés.

Patrick: Je suis totalement d'accord avec toi, la marge de variation est effectivement très large, et c'est pourquoi j'ai pris des valeurs centrales. Je voudrais également mentionner le fait que dans des conditions « standardisées », le différentiel de coûts entre le nucléaire et les fossiles est énorme si l'on prend en compte une « valeur tutélaire du carbone » pour les décisions publiques, par exemple les 100 euros par tonne de CO₂ préconisés pour 2030 par le rapport Quinet¹ : si on traduit cette « valeur du carbone » pour une centrale au charbon, cela revient à doubler les coûts de production (800 g CO₂/kWh et 100 euros par tonne de CO₂ : on ajoute environ 80 euros par MWh pour une centrale au charbon et 40 euros par MWh pour une centrale au gaz naturel). Dans les valeurs que j'ai données, je n'ai pas pris 100 euros, mais 50 euros par tonne de carbone. Je suis d'accord pour dire que les incertitudes sont majeures. Néanmoins cela vaut le coup de passer par cette tentative de calibrage.

Daniel: En France, et même en Europe, la consommation d'énergie a-t-elle des raisons de croître ?

1. La commission Quinet (2008-2009) devait donner les indications sur ce que l'on appelait la valeur tutélaire du carbone, destinée à servir de base au calcul d'une taxe carbone, qui n'a pour l'instant pas vu le jour (NdE).

Patrick: Oui, elle a des raisons de croître, mais très modérément en Europe. Cette augmentation de la consommation d'énergie proviendrait des pays d'Europe du Sud et d'Europe de l'Est, en parallèle d'un phénomène de saturation de la consommation d'énergie dans le reste de l'Europe. Cela alors que la population de plusieurs pays européens est appelée à décroître, notamment en Allemagne, en Italie et dans les pays d'Europe centrale.

Daniel: Par conséquent, si l'on prend en compte une amélioration de l'efficacité énergétique, on n'a pas besoin d'installations supplémentaires.

Patrick: Je dois apporter une précision à ce que je viens de dire sur la consommation d'énergie : cela est largement vrai hors consommation d'électricité, car la multiplication des systèmes électriques, par exemple les énormes data centers, les millions de smartphones et d'ordinateurs portables à recharger, etc., consomment énormément d'électricité. Ce déplacement vers l'électricité est assez spontané et correspond à de nouveaux besoins et de nouveaux usages que l'on chiffre à environ 10 % de la consommation totale d'électricité et qui sont très dynamiques. Par ailleurs, je pense que tous les raisonnements à caractère prospectifs doivent être menés simultanément dans deux mondes différents, un monde « sans politique climatique » et un monde « avec politique climatique ». Dans le monde « avec politique climatique », il y a encore plus d'efficacité énergétique et de sources d'énergie sans carbone, mais même dans le monde « sans politique climatique », la consommation d'énergie n'augmente pas beaucoup spontanément.

Isabelle: N'y a-t-il pas une contradiction, un paradoxe dans le fait que l'électricité en France soit à 75 % d'origine nucléaire et qu'il faille pourtant encore réduire par quatre nos émissions de CO₂ pour respecter nos engagements ? On peut se demander si le nucléaire, qui ne représente en fait que 17 % de l'énergie consommée en France, est vraiment une solution efficace et non émettrice de CO₂ ? Et comment vont faire les autres pays européens, qui sont beaucoup moins nucléarisés ?

Daniel: L'efficacité du nucléaire à ne pas émettre de CO₂ peut se calculer, mais elle peut aussi se constater. La France émet

7 tonnes de CO₂ par habitant et par an alors que l'Allemagne en émet 10,5 tonnes. C'est exactement 50 % de plus. Bien sûr, il fait un peu plus froid en Allemagne qu'en France, mais cela n'explique pas tout!

Patrick: Effectivement, si l'on considère les émissions de CO₂ liées à la consommation d'énergie (bâtiment, transport, industrie et production d'électricité), force est de constater qu'un Français émet un tiers de moins de CO₂ qu'un Allemand.

Nucléaire et emploi

La vision macroéconomique

Isabelle: Un mot rapide sur le nucléaire et l'emploi, car c'est un argument utilisé à la fois par les pro et les antinucléaires: pour les uns, la filière nucléaire est un bassin d'emploi considérable, dont on ne peut se passer; pour les seconds, l'industrie des énergies renouvelables est plus génératrice d'emplois que l'industrie nucléaire.

Patrick: Le point de vue économique et social est en effet un aspect important du débat. En 1981, une commission sur le contenu en emplois des différentes solutions énergétiques avait été créée, avec en arrière-plan l'idée que les renouvelables pouvaient créer plus d'emplois et qu'il fallait donc favoriser leur développement. Cette étude fait partie des quelques expériences structurantes que j'ai eues en tant que chercheur, car en travaillant sur cette question je me suis aperçu que le critère du nombre d'emplois par source d'énergie était en fait un très mauvais critère, ou plutôt un critère « piégeux ».

Michel: En raison du décompte du nombre d'emplois directs et indirects?

Patrick: Oui précisément, et parce qu'il faut comparer des solutions avec contenu d'importation comparable. Lorsqu'on utilise une énergie fossile, la création d'emplois est faible car on utilise une ressource naturelle dont la rente et la valeur ajoutée sont réalisées à l'étranger. Les solutions à faible contenu d'importation

créeront plus d'emplois sur le sol national et seront de ce point de vue préférable. Mais dans la comparaison entre deux solutions de ce dernier type, celle qui crée le plus d'emplois risque d'être aussi la solution la plus coûteuse, ou la moins efficace.

C'est ce que nous enseigne la macroéconomie et ce fut pour moi une révélation: une solution qui crée beaucoup d'emplois par unité d'énergie produite serait par exemple d'aller chercher du charbon avec une pelle!

Les options qui créent le plus d'emplois directs ne sont pas forcément les meilleures, d'autant qu'après bouclage macroéconomique, cela risque d'être un boulet pour l'économie: l'option coûtera plus cher et se traduira par un déficit de compétitivité. C'est pourquoi il faut être très prudent sur ces questions d'emplois créés par les différentes options énergétiques. On ne peut pas dire a priori que l'option qui crée le plus d'emplois est la bonne solution.

Isabelle: Mais on ne peut pas se permettre de négliger la question de l'emploi. Et sans aller chercher le charbon à la pelle, si l'on compare des options énergétiques équivalentes en termes d'émissions de CO₂ (dites iso-CO₂) comme le nucléaire et les renouvelables, est-ce que les renouvelables créent plus d'emplois que le nucléaire, comme cela semble être le cas en Allemagne?

Patrick: Il faut savoir que l'Allemagne importe maintenant de Chine plus de 60 % de ses panneaux photovoltaïques, et qu'il s'agit donc essentiellement d'emplois dans le secteur du bâtiment pour la pose des panneaux. En fait, c'est typiquement un point qu'il faut traiter du point de vue macroéconomique en prenant en compte la création d'emplois directs avec ses ambivalences, l'impact sur la macroéconomie, le coût de l'énergie et les emplois indirects après bouclage macroéconomique. Et à cela s'ajoutent aujourd'hui les effets de la compétition industrielle dans une économie mondialisée, y compris pour les technologies des renouvelables.

Michel: Si l'on arrêta le nucléaire durant un certain laps de temps, et que l'on doive à un moment donné y recourir à nouveau, on achèterait alors nos centrales en Chine... Parce que les Chinois ne sont pas prêts de s'arrêter.