

L'électricité au cœur de notre futur bas carbone

par

■ Yves Bamberger ■

Ancien directeur d'EDF R&D, membre de l'Académie des technologies,
coauteur de *L'électricité, au cœur de notre futur bas carbone*

En bref

L'ampleur du changement climatique dépend du cumul de toutes les émissions de gaz à effet de serre au cours du temps. Il est donc urgent de réduire rapidement ces dernières et, pour cela, de déployer dès maintenant les meilleures technologies bas carbone disponibles, tout en poursuivant l'effort de recherche pour développer les innovations qui permettront de faire mieux et moins cher dans les décennies à venir. Selon Yves Bamberger, les trois piliers techniques de la décarbonation sont l'usage rationnel de l'énergie, l'électrification chaque fois que possible et la décarbonation de l'électricité. Encourager les économies d'énergie à travers l'isolation des bâtiments, par exemple, ne suffit pas, car rien ne garantit que l'énergie utilisée est faiblement émissive. Il faut inciter le consommateur à adopter les technologies et énergies réduisant réellement les émissions de gaz à effet de serre et, dans cette compétition, l'électricité sort généralement gagnante, du moins en France. L'électricité devrait ainsi être au cœur de la transition énergétique, à condition toutefois qu'elle soit décarbonée et que les pouvoirs publics adoptent les bons indicateurs.

Compte rendu rédigé par Élisabeth Bourguinat

L'Association des Amis de l'École de Paris du management organise des débats et en diffuse les comptes rendus, les idées restant de la seule responsabilité de leurs auteurs. Elle peut également diffuser les commentaires que suscitent ces documents.

Séance du cycle La Transition énergétique.

Parrains & partenaires de l'École de Paris du management :

Algoé¹ • Chaire Futurs de l'industrie et du travail • Chaire Mines urbaines • Chaire Phénix – Grandes entreprises d'avenir • EDF • ENGIE • Executive Master – École polytechnique • Fabernovel • Groupe BPCE • GRTgaz • IdVectoR² • L'Oréal • La Fabrique de l'industrie • Mines Paris – PSL • RATP • Université Mohammed VI Polytechnique • UIMM • Ylios¹

1. pour le séminaire Vie des affaires / 2. pour le séminaire Management de l'innovation



Autres séances du cycle La Transition énergétique :

« Débat sur les voies de la transition énergétique »

par Didier Holleaux, directeur général adjoint d'ENGIE
et Jean-Marc Jancovici, associé fondateur de Carbone 4,
président de The Shift Project et professeur à MINES ParisTech

« Transition énergétique : que peut-on attendre de l'État ? »

par Cécile Dufлот, directrice générale d'OXFAM France, ancienne ministre,
Didier Holleaux, directeur général adjoint d'ENGIE
et Didier Houssin, ancien président d'IFP Énergies nouvelles, ancien directeur des politiques
et des technologies énergétiques durables de l'Agence internationale de l'énergie

« L'hydrogène sera-t-il un bon successeur aux énergies fossiles ? »

par Philippe Haffner, président d'Haffner Energy,
Didier Holleaux, directeur général adjoint d'ENGIE
et Henri Prévot, auteur de *Trop de pétrole ! Énergie fossile et réchauffement climatique*

« La taxe carbone est-elle nécessaire ? Est-il possible de la mettre en œuvre ? »

par Emmanuel Combet, chercheur, économiste sénior à l'ADEME (direction exécutive Prospective et Recherche)
par Claude Henry, professeur honoraire à l'École polytechnique et à Columbia University
et Didier Holleaux, directeur général adjoint d'ENGIE

« La transition énergétique accélérée : le nouveau pari des GAFAM »

par Mathias Lelièvre, CEO, ENGIE Impact

« Ecov, l'innovation privée au service de l'action publique »

par Laure Ménétrier, vice-présidente d'Ecov

« Vers une pénurie d'électricité ? »

par Patrice Geoffron, professeur au laboratoire d'économie de l'université Paris Dauphine-PSL, Pierre Germain,
partenaire fondateur d'E-CUBE Strategy Consultants et Didier Holleaux, directeur général adjoint d'ENGIE



La seule chose qui ne soit pas limitée sur notre planète, en dehors de l'intelligence et de la créativité des hommes, c'est l'énergie : le soleil nous fournit, en moyenne, sur l'année, environ 9 000 fois l'énergie dont nous avons besoin. Le problème n'est donc pas tant de réduire la quantité d'énergie que nous utilisons que de remédier aux conséquences de cette utilisation, telles les émissions de gaz à effet de serre (GES) ou la pollution.

Par ailleurs, l'énergie a pour caractéristique d'être impliquée dans toutes les formes de l'activité humaine et, par conséquent, dans toutes les dimensions du développement durable. Elle concerne à la fois le citoyen, le travailleur, le consommateur, le client et l'électeur. C'est pourquoi la gestion de l'énergie impose une approche systémique aussi harmonieuse que possible, cherchant à concilier les intérêts contradictoires, les diverses échelles de valeur et les différents horizons temporels.

Les piliers techniques de la décarbonation

L'urgence de la décarbonation impose de déployer, sans attendre, les meilleures technologies bas carbone disponibles, tout en poursuivant l'effort de RD&D (recherche, développement et démonstration) pour développer des innovations qui permettront de faire mieux et moins cher dans les décennies à venir.

Parmi les principaux piliers techniques de la décarbonation, le premier est l'usage rationnel de l'énergie, expression que je préfère à celle de sobriété énergétique. Il me paraît difficile de parler de sobriété à une maman qui vit dans les favelas de Rio ou à des chômeurs résidant en Seine-Saint-Denis, d'autant que, comme je le soulignais à l'instant, il n'existe pas vraiment de limites dans les possibilités d'accès à l'énergie.

Le deuxième pilier de la décarbonation est l'électrification chaque fois que possible. Selon l'ADEME, la maximisation du recours à l'électricité permettrait de réduire la consommation finale d'énergie et les émissions de CO₂ de 40 % à l'horizon 2050. En effet, compte tenu de la part du nucléaire et de l'hydraulique dans notre mix énergétique, l'électricité française est l'une des plus faiblement carbonées au monde : le taux moyen est de 36 grammes (g) de CO₂ par kilowattheure — valeur que j'arrondirai à 40 g dans la suite de la présentation —, contre 475 g pour la moyenne mondiale, et autour de 400 g pour la moyenne européenne (380 g pour l'Allemagne en 2019), soit plus de 10 fois le taux français. Ainsi, en 2019, selon les données de l'AIE (Agence internationale de l'énergie) et de RTE (Réseau de transport d'électricité), les émissions de CO₂ en France s'élevaient à 294 millions de tonnes, dont 19,2 millions pour la production d'électricité. Manifestement, nos efforts de décarbonation ne devraient pas porter prioritairement sur l'électricité, mais sur les 275 millions de tonnes de CO₂ liées aux autres sources d'énergie.

Le troisième pilier est la décarbonation des nouvelles sources de production d'électricité, condition pour pouvoir recourir toujours davantage à ce vecteur.

Les projections sur les besoins en électricité

Les projections sur les besoins en électricité à l'horizon 2050 ont fait l'objet de nombreuses controverses. En Allemagne, en 2011, au lendemain de la catastrophe de Fukushima, la politique gouvernementale de fermeture des centrales nucléaires s'est appuyée sur une prévision de réduction de 25 % de la consommation d'électricité en 2050 par rapport à 1990. De son côté, sur la même période, la France prévoyait une faible augmentation, avec une consommation passant de 450 térawattheures (TWh) à 500 ou 550 TWh.

Ces projections ont été profondément remises en cause. L'Allemagne table désormais sur une augmentation de 80 % de sa consommation d'électricité d'ici 2050. En France, le rapport publié par RTE prévoit une diminution

de la consommation finale d'énergie, de 1 600 TWh actuellement à 930 TWh en 2050, mais, au sein de celle-ci, une augmentation de 40 % de la part de l'électricité, passant ainsi de 25 à 55 % – soit de 500 TWh actuellement à 645 TWh en 2050. Cette augmentation en valeur aussi bien relative qu'absolue ne concerne pas que la France : il s'agit d'un mouvement mondial, observé tant dans les pays de l'OCDE que dans les pays moins avancés.

La notion d'énergie primaire

Lorsqu'un particulier consomme 1 kilowattheure (kWh) de gaz chez lui, on considère qu'il consomme 1 kWh d'énergie primaire, en négligeant les éventuelles pertes.

Il en va différemment lorsqu'il consomme 1 kWh d'électricité, puisque cette dernière est un vecteur d'énergie et non une source d'énergie à proprement parler. Si ce kilowattheure d'électricité a été produit par une centrale hydraulique, une éolienne ou des panneaux photovoltaïques, on admet, selon la convention internationale de l'AIE et en négligeant les pertes, qu'il correspond à 1 kWh d'énergie primaire. En revanche, s'il a été produit par une centrale à gaz dont le rendement est de 50 %, il correspond à 2 kWh d'énergie primaire. Enfin, si cette électricité a été produite par une centrale nucléaire, et dans la mesure où le rendement du cycle thermodynamique d'une centrale nucléaire est d'environ 33 %, on considère, toujours selon la convention de l'AIE, que chaque kilowattheure d'électricité correspond à 3 kWh d'énergie primaire, même si cela n'a pas beaucoup de sens "physique".

Dans les pays où la part du nucléaire dans la production d'électricité est minime, cette convention sur son équivalent en énergie primaire n'a guère d'impact, mais, dans un pays comme la France ou dans d'autres pays où la part du nucléaire est supérieure à 10 ou 20 % du mix énergétique, cela modifie sensiblement les calculs.

Dans le cas d'un pays où le mix électrique comprendrait 60 % de nucléaire, 30 % d'hydraulique, d'éolien ou de photovoltaïque, et 10 % de gaz, 1 kWh d'électricité équivaldrait à 2,3 kWh d'énergie primaire. Cet exemple imaginaire n'est pas très loin du cas français et, de fait, la valeur retenue dans notre pays depuis l'été 2021 est de 2,3 kWh d'énergie primaire par kilowattheure d'électricité consommée.

Les pompes à chaleur

À l'heure actuelle, on peut identifier sept technologies clés pour la décarbonation de l'énergie. Trois d'entre elles concernent la production (photovoltaïque, nucléaire et hydrogène décarboné) et trois autres, la consommation (pompes à chaleur, solaire thermique et batteries) ; la septième technologie est la capture et le stockage du CO₂.

Je vais me concentrer sur la technologie des pompes à chaleur (PAC), qui est sans doute la moins connue, alors que c'est un moyen assez magique de décarboner l'énergie aussi bien à la maison que dans les bureaux ou dans une partie de l'industrie.

Une pompe à chaleur – le réfrigérateur et le climatiseur sont des pompes à chaleur – fait l'inverse de ce que fait la nature. Elle prend la chaleur là où il fait froid, c'est-à-dire, en hiver, à l'extérieur de la maison, et la conduit là où il fait déjà chaud, c'est-à-dire à l'intérieur. Son fonctionnement est basé sur la circulation d'un fluide alternativement gazeux et liquide.

Le côté magique du dispositif vient de ce qu'il pompe davantage de chaleur qu'il ne consomme d'électricité pour faire tourner le compresseur. Le rapport du kilowattheure de chaleur produite sur le kilowattheure d'électricité consommée s'appelle le COP (coefficient de performance) et il est en moyenne de 3 : avec 1 kWh d'électricité, l'appareil récupère 3 kWh de chaleur. Ce rapport peut varier en fonction de nombreux facteurs, comme la température extérieure (quand il fait très froid, le COP diminue) ou le type de pompe à chaleur (air-air, air-eau, eau-eau, sol-eau). Un autre inconvénient est le risque de pollution : dans les débuts de cette technologie, certains des fluides utilisés pouvaient émettre des gaz à effet de serre en cas de fuite, mais des progrès ont été réalisés dans ce domaine.

De l'importance du choix des indicateurs

Pour élaborer une bonne politique de décarbonation, il est important de choisir le bon indicateur : faut-il limiter la consommation primaire ou les émissions de GES? Le résultat ne sera pas du tout le même.

Prenons l'exemple de deux maisons individuelles identiques, dont le besoin annuel de chauffage est de 4 mégawattheures (MWh). La première est chauffée au gaz et, en admettant que la chaudière a un rendement de 100%, sa consommation d'énergie primaire est de 4 MWh. En revanche, à raison de 200 g de CO₂ émis par kilowattheure de gaz brûlé, les émissions représentent 800 kilogrammes (kg) de CO₂ par an. La deuxième maison est chauffée à l'électricité. Compte tenu du taux de 2,3 évoqué tout à l'heure, sa consommation d'énergie primaire est de 9,2 MWh, mais les émissions de CO₂ ne sont que de 160 kg par an. Si, de surcroît, cette maison est équipée d'une pompe à chaleur de COP 3, le besoin annuel de chauffage est réduit des deux tiers. La consommation d'énergie primaire n'est alors plus que de 3,1 MWh, et les émissions de CO₂, de 53 kg par an.

En d'autres termes, si la réglementation thermique privilégie l'indicateur de la consommation d'énergie primaire, elle favorise le gaz et ne contribue pas à la réduction des émissions de GES. C'était le cas dans la réglementation thermique du bâtiment RT2012, ce qui a eu des conséquences sur nos importations de gaz et sur les constructions effectuées selon cette réglementation. Heureusement, la situation a changé avec la réglementation environnementale RE2020 qui, comme le changement d'intitulé l'affiche, commence à prendre en compte l'environnement (avec un indicateur sur les émissions liées à la construction et relatif à la vie du bâtiment).

Le choix de l'indicateur est tout aussi crucial lorsque l'on souhaite réduire les émissions dans les bâtiments existants. Reprenons l'exemple de la maison dont le besoin annuel de chauffage est de 4 MWh. Faut-il privilégier la réduction de la consommation, susceptible d'entraîner une diminution des émissions, ou directement la réduction des émissions? La réduction de la consommation peut passer par l'isolation thermique de la maison. Avec une performance d'isolation de 50%, le besoin de gaz est réduit à 2 MWh, ce qui représente 400 kg d'émissions de CO₂. Une autre option consiste à ne pas isoler, mais à installer une pompe à chaleur de COP 3, ce qui donne, comme on l'a vu, une consommation d'énergie primaire de 3,1 MWh et des émissions de CO₂ de 53 kg par an. Même si d'autres éléments sont à prendre en compte dans le choix entre isolation et pompe à chaleur – le coût d'investissement et de fonctionnement, le TRI (taux de rendement interne), les défauts de réalisation, l'effet rebond, les intérêts parfois divergents des propriétaires et des locataires... –, on voit que prioriser systématiquement l'isolation des logements n'est peut-être pas le meilleur moyen de réduire les émissions de CO₂. Cela ne signifie pas qu'il ne faut pas isoler, mais qu'il y a sans doute un équilibre à chercher entre les différentes incitations.

Chauffage électrique et émissions de CO₂

Je dois mentionner ici une controverse sur les émissions de CO₂ liées au chauffage électrique. Pendant la période de chauffage (de mi-octobre à mi-avril), la consommation nationale d'électricité est plus forte, d'autant qu'au chauffage s'ajoute une durée d'éclairage supplémentaire. On peut donc craindre une augmentation des émissions de CO₂ pour chaque kilowattheure d'électricité. Certains avancent ainsi qu'en hiver, installer une nouvelle pompe à chaleur ou même allumer une lampe dans sa salle à manger serait susceptible de déclencher le recours à une centrale à charbon polonaise. Cela n'est pas très sérieux. Il faut faire le bilan sur la saison de chauffe! En outre, lorsque les pouvoirs publics lancent une politique d'électrification ou une politique de basculement du mazout ou du gaz vers l'électricité, ils peuvent anticiper l'accroissement global des besoins et programmer en conséquence l'augmentation nécessaire de la production électrique.

Hydraulique et photovoltaïque sur les toits

Après avoir évoqué la décarbonation de l'énergie du point de vue de la consommation, j'en viens aux aspects concernant la production. Deux solutions me semblent insuffisamment exploitées à l'heure actuelle.

La première consisterait à prioriser systématiquement l'hydraulique, non seulement pour la production, mais également pour le stockage, sous la forme de stations de pompage (aux heures creuses) et de turbinage (aux heures pleines). Ainsi, l'hydraulique, qui est en elle-même une source d'énergie renouvelable, permettrait également de valoriser les autres énergies renouvelables, généralement intermittentes. Cette option est valable y compris en France, où il existe encore des sites pouvant, techniquement, accueillir des barrages. Malheureusement, quand on voit à quelles résistances se heurte tout projet d'éolienne, on peut douter que nos élus soient disposés à envisager cette perspective.

La deuxième piste consisterait à prioriser le photovoltaïque sur les toits afin d'éviter de neutraliser des terres agricoles. Selon une étude allemande, le potentiel de production de photovoltaïque sur les toits en France serait de l'ordre de 250 TWh, ce qui représente une bonne partie de l'augmentation prévisible de la consommation.

Le désastre du rachat de l'électricité photovoltaïque

Un contre-exemple absolu de management de la transition énergétique est le tarif de rachat de l'électricité d'origine photovoltaïque mis en œuvre en France au début des années 2000, en s'inspirant de l'exemple américain. À l'époque, un particulier qui installait des panneaux sur le toit de sa maison ou dans son champ se voyait garantir le rachat de l'électricité produite à un prix nettement plus élevé que celui du marché, et cela pour vingt ans. Les engagements pris jusqu'en 2017 ont entraîné des surcoûts annuels de 5, 6 ou même 7 milliards d'euros, avant que ces montants ne décroissent progressivement, du fait de la baisse du tarif de rachat.

À qui faire payer ces surcoûts? Au départ, il n'était pas question de les imputer à l'État, et on n'a pas voulu non plus les faire payer à l'ensemble des consommateurs d'énergie. Ce sont uniquement les consommateurs d'électricité qui ont financé l'installation de panneaux photovoltaïques sur les toits de leurs concitoyens, alors que les utilisateurs d'essence ou de gaz étaient dispensés de toute contribution au développement du photovoltaïque.

Ceci a eu pour effet d'augmenter le prix de l'électricité alors que chacun sait que, pour que la transition énergétique soit réussie, elle doit être inclusive et ne laisser personne au bord de la route.

Une absurdité supplémentaire est que cette politique a été lancée alors que la filière française du photovoltaïque n'était pas prête à faire face à ce nouveau marché, en sorte qu'elle a bénéficié essentiellement à la concurrence étrangère.

Cette expérience illustre la nécessité, en matière de transition énergétique, de raisonner de façon systémique, y compris en réfléchissant aux échelles de temps permettant à l'industrie de se doter des compétences nécessaires avant de promouvoir de nouvelles technologies.

Temporalités et équité

Si nous voulons avoir totalement décarboné l'économie d'ici 2050, il est essentiel de prendre en compte la question des temporalités. La durée de vie des chaudières est de quinze ans, ce qui laisse le temps de les remplacer toutes d'ici 2035. Il en va de même pour les véhicules. En revanche, la transformation d'une usine sidérurgique est beaucoup plus longue, tout comme la construction d'une centrale nucléaire ou d'un barrage. Il faut donc être réaliste sur la disponibilité des différentes solutions et agir sans délai avec les technologies dont nous disposons aujourd'hui.

Compte tenu du caractère systémique de la transition énergétique, nous avons besoin de politiques claires et stables, afin que le citoyen et l'industriel les comprennent et puissent agir et investir en conséquence. Dans ce domaine, plutôt que la taxe carbone qui a suscité le mouvement des Gilets jaunes, Teddy Püttgen¹ et

1. Coauteur, avec Yves Bamberger, de *L'électricité, au cœur de notre futur bas carbone – Sauvegarder notre niche écologique*, EPFL Press, 2021.

moi-même proposons une redevance sur les produits contenant du carbone, qui serait redistribuée de façon égale entre tous, afin de manifester que nous sommes tous concernés par le carbone rejeté dans l'atmosphère. Si nous voulons que nos enfants et les générations suivantes puissent vivre correctement sur cette planète, nous devons sauver notre niche écologique de manière raisonnée, mais également choisie et partagée.

Débat



La filière des pompes à chaleur

Un intervenant : *Vous avez rappelé le désastre de la politique concernant le développement du photovoltaïque. Avons-nous la capacité industrielle de fabriquer des pompes à chaleur ou vont-elles également être importées massivement, au détriment de l'emploi, de notre balance commerciale et de notre fiscalité ?*

Yves Bamberger : Les pompes à chaleur sont en train de devenir le système dominant dans les constructions neuves et la filière commence à être bien structurée, aussi bien pour les particuliers que pour l'industrie, même si tous les composants ne sont pas fabriqués en France. Le frein risque plutôt de venir de la pose de ces équipements, qui nécessite des compétences à la fois en électricité et en plomberie. Par ailleurs, on peut s'interroger sur le soutien apporté à cette filière, par comparaison avec d'autres. Certains lobbies ne sont pas forcément enthousiasmés par l'électrification de l'énergie...

Int. : *À Paris, beaucoup d'immeubles haussmanniens sont chauffés au gaz. Serait-il envisageable de remplacer ces chaudières par des pompes à chaleur ?*

Y. B. : Plus de la moitié des Français sont logés en maisons individuelles et peuvent donc s'équiper de pompes à chaleur. Il existe également des modèles de grande taille que l'on peut installer dans des immeubles neufs. En ce qui concerne les immeubles anciens, s'il y a un chauffage collectif, il suffit de remplacer la chaudière au mazout ou au gaz par une pompe à chaleur. Sinon, il faut que ce remplacement ait lieu dans le cadre d'une rénovation en profondeur qui permette d'installer la pompe à chaleur à la cave et de faire circuler les réseaux de chauffage à travers tous les appartements.

On trouve aussi des pompes à chaleur d'appartement, mais personne ne souhaite voir des compresseurs sur tous les balcons de Paris, comme c'est le cas, pour la climatisation, dans les pays du tiers-monde.

Le stockage de l'électricité

Int. : *Si la part des sources d'énergie intermittentes s'accroît dans le mix énergétique, comment pourra-t-on stocker suffisamment d'électricité pour assurer la stabilité du système ?*

Y. B. : Les systèmes électriques sont probablement les systèmes techniques les plus complexes que l'homme ait jamais conçus. Ils comprennent à la fois les sites de production, les réseaux (très haute tension, haute tension et distribution) et les terminaux. Historiquement, la production européenne était assurée par quelques milliers de centrales de différents types, mais elle repose désormais également sur des centaines de milliers d'éoliennes ou de panneaux solaires, ce qui n'a fait que complexifier son pilotage.

Le secret de la stabilité du système électrique européen, maintenue en dépit des caprices de la météo ou des variations de la demande, réside dans l'inertie des génératrices. Une fois que leurs énormes rotors

ont acquis la vitesse de 1 500 ou 3 000 tours par minute, ils peuvent sans difficulté supporter les à-coups de la demande. Par ailleurs, leur vitesse peut être pilotée en fonction des besoins. En revanche, si la part des énergies non pilotables, comme l'éolien ou le solaire, venait à augmenter fortement, la stabilité du système risquerait d'être compromise.

Ceci plaide pour la relance de l'hydraulique, afin d'accroître non seulement la production d'électricité renouvelable, mais également les capacités de stockage. On pourrait envisager de construire quelques barrages supplémentaires, mais aussi de surélever certains barrages existants. Une autre solution, utilisée en Suisse, consiste à ajouter un deuxième barrage au-dessus ou en-dessous du premier pour permettre le pompage-turbinage. Enfin, on pourrait également implanter des stations de pompage sur des falaises en bord de mer.

Cela dit, même si la capacité de stockage hydraulique passait d'environ 5 000 MWh actuellement à 7 000 MWh, elle serait insuffisante dans le cas où la part du nucléaire baisserait significativement au profit des énergies intermittentes.

Face à cette difficulté, certains pays européens envisagent de stocker l'énergie chez leurs voisins, mais il y a beaucoup de demandeurs et peu d'offreurs. De plus, les anticyclones évoluent généralement à l'échelle de l'Europe, en sorte que la production éolienne et la production photovoltaïque s'arrêtent presque partout en même temps, et ce, parfois, pour une semaine ou davantage, ce qui, dans le cas d'un mix dominé par les énergies intermittentes, entraînerait des besoins de stockage colossaux.

L'une des pistes actuelles consiste à produire de l'hydrogène à partir d'électricité décarbonée, puis à retransformer cet hydrogène en électricité, mais cette méthode a un rendement assez faible, de l'ordre de 33 %.

Une autre solution consisterait à conserver quelques turbines à gaz pour couvrir les quelques centaines d'heures de production problématiques sur une année.

La meilleure option consiste vraisemblablement à conserver une part suffisante de production nucléaire et de production hydraulique au fil de l'eau.

Int. : *Je m'étonne que vous évoquiez l'existence de sites français sur lesquels il serait possible de construire des barrages car, il y a quelques années, un ingénieur d'EDF m'avait affirmé catégoriquement que tout ce qui était faisable avait été fait. Pouvez-vous nous en dire davantage ?*

Y. B. : Dans les tiroirs d'EDF dorment des projets qui ne semblaient pas intéressants il y a quelques années et qui, avec l'évolution du contexte et des besoins de stockage, pourraient devenir rentables. Je connais au moins deux sites offrant un potentiel de 800 MW chacun, mais je me garderai bien de les nommer car, aussitôt, des associations de défense se constitueraient...

Int. : *Qu'en est-il du stockage intersaisonnier ?*

Y. B. : C'est une pratique très ancienne. Jadis, de nombreux châteaux étaient équipés d'une glacière, sorte de cave dans laquelle on empilait de la glace en hiver pour pouvoir conserver les aliments au frais pendant l'été.

Aujourd'hui, aux Pays-Bas, plusieurs milliers de maisons recourent à un dispositif intersaisonnier consistant à utiliser, pour la climatisation, de l'eau froide impropre à la consommation et située dans des nappes souterraines, puis à chauffer cette eau par la climatisation pendant l'été, avant de récupérer en hiver la chaleur ainsi accumulée pour chauffer les maisons. Des bâtiments de plus grande taille, comme le Bundestag en Allemagne, l'aéroport de Zurich ou quelques hôpitaux français, sont climatisés et chauffés selon le même principe.

La limite de cette pratique est le risque, au bout de quelques années, de réchauffer le sol. À Wuhan, ville très chaude en été et assez froide en hiver, certains bâtiments recourent au stockage intersaisonnier dans la nappe phréatique, mais pour les deux tiers de leurs besoins seulement, le reste étant assuré par un système de climatisation puisant le froid dans l'air, ceci dans le but de maintenir la température de la nappe.

L'Académie des technologies a constitué un petit groupe de travail qui discute avec les professionnels pour vérifier s'il n'y aurait pas des aménagements à apporter à la réglementation française afin de favoriser le développement de ce genre de dispositifs.

Produire de l'énergie solaire au Sahara ?

Int. : *Vous paraîtrait-il envisageable de construire des fermes solaires au Sahara, d'y fabriquer de l'hydrogène – ce qui créerait des emplois sur place –, puis de rapatrier l'hydrogène en Europe? Peut-être cela contribuerait-il à freiner les flux migratoires actuels?*

Y. B. : Techniquement, c'est faisable, mais cela coûterait cher et, surtout, cela poserait un problème éthique. Compte tenu du taux d'électrification en Afrique, si des fermes solaires se construisent là-bas, il faudrait qu'elles servent aux Africains, ce qui améliorerait leur niveau de vie et les aiderait à rester dans leur pays.

Par ailleurs, une partie non négligeable des tensions entre pays naissent de rivalités pour s'approprier la ressource en eau ou en énergie. Je ne crois pas qu'il soit dans l'intérêt de l'Europe de dépendre du gaz russe d'un côté, et du soleil du Sahara de l'autre.

Le nucléaire fait-il partie de l'équation finale ?

Int. : *Le tarif de l'électricité d'origine nucléaire est trois ou quatre fois supérieur à celui de l'électricité d'origine renouvelable. À ceci s'ajoute le coût de fin de vie des centrales nucléaires. Les sommes que la Belgique a imposé à ENGIE de provisionner pour le démantèlement futur des deux centrales nucléaires belges sont sans commune mesure avec celles prévues en France. Le nucléaire peut-il faire partie de l'équation finale?*

Y. B. : La question clé est celle des politiques publiques, qui doivent être claires et durables. Nous ne sommes pas plus idiots que nos prédécesseurs et, si notre gouvernement est capable de tracer aux industriels des perspectives crédibles, je n'ai aucun doute sur le fait que ceux-ci sauront s'organiser – comme ils l'ont fait pour fabriquer le TGV ou l'Airbus – afin de produire du nucléaire à des coûts raisonnables. La vraie difficulté n'est pas de réduire le coût du nucléaire, mais de prendre des décisions et de s'y tenir.

S'agissant du démantèlement, les coûts provisionnés aux États-Unis sont assez proches de ceux prévus en France. La question qui se pose est celle des économies d'échelle, selon que l'on organise le démantèlement sous forme d'artisanat ou sur un mode industriel. Avec la robotique dont nous disposons aujourd'hui, il doit être possible de réduire très fortement les coûts.

Peut-être un jour sera-t-il envisageable de se passer du nucléaire, mais, dans l'immédiat, la priorité pour l'Europe est de disposer de suffisamment d'énergie décarbonée à un coût permettant à notre économie de survivre.

Voitures électriques et Internet

Int. : *Je suis surpris de voir baisser la consommation finale dans vos hypothèses, alors qu'il existe au moins deux secteurs en croissance forte, celui des véhicules électriques et celui du digital et d'Internet.*

Y. B. : Lorsque l'on remplace des moteurs thermiques par des moteurs électriques, que ce soit dans les véhicules ou dans l'industrie, la consommation d'électricité augmente, mais la consommation d'énergie finale est, en moyenne, divisée par deux.

On estime que le digital, Internet et les télécommunications représentent entre 8 et 10% de la consommation mondiale d'électricité, mais une partie de ces activités servent à réduire la consommation d'énergie, par exemple en régulant mieux certains systèmes.

Par ailleurs, la moitié seulement de la consommation d'électricité imputée aux secteurs du digital et de la communication est liée aux usages de ces services, et l'autre moitié, à la production des équipements. Un moyen efficace de réduire cette consommation consiste donc à conserver nos téléphones plus longtemps. On peut espérer que la progression du recyclage et les nouvelles règles qui se préparent pour lutter contre l'obsolescence programmée nous y aideront.

Le coût de l'électricité

Int. : *Vous avez beaucoup parlé de kilowattheure et de CO₂, mais assez peu d'euros, c'est-à-dire du coût de l'énergie. De ce point de vue, le gaz, dont l'efficacité énergétique est remarquable, offre sans doute des perspectives plus favorables que l'électricité, dont le prix ne cesse d'augmenter en raison des options techniques prises en matière d'énergie solaire, notamment.*

Y. B. : Il est exact que le gaz offre une grande efficacité énergétique, mais bien moindre que celle des pompes à chaleur. Le rendement d'une chaudière à gaz est de 90 % et celui d'une pompe à chaleur de COP 3 de 300 %.

Quant au coût de l'électricité, il ne résulte pas de choix techniques, mais politiques. Nos gouvernants ont décidé de faire financer le solaire et l'éolien par les consommateurs d'électricité plutôt que par le budget de l'État ou par l'ensemble des consommateurs d'énergie. Sans cela, le prix de l'électricité aurait pu rester stable, puisque la production est assurée à 75 % par les centrales nucléaires.

Enfin, à partir du moment où l'on considère que l'arrêt des émissions de CO₂ est une condition de survie pour l'humanité, la question n'est plus de savoir si l'utilisation du gaz est préférable à celle d'autres énergies, mais de comprendre comment on peut mettre un terme à toutes les émissions de CO₂ et conserver la même qualité de vie avec de l'électricité, du solaire thermique, ou encore de l'hydrogène.

Et la sobriété énergétique ?

Int. : *J'habite dans un département rural et j'ai assisté récemment à une réunion au cours de laquelle des représentants d'usagers souhaitaient voir installer des bornes publiques ultrarapides pour pouvoir recharger leurs SUV électriques ou hybrides en dix minutes. Je crains que beaucoup de nos concitoyens ne voient dans les nouvelles technologies et les politiques publiques mises en œuvre qu'une nouvelle façon de faire la même chose qu'avant. Pourquoi évacuer aussi vite la notion de sobriété ?*

Y. B. : Je n'ai pas cherché à évacuer cette notion. J'ai seulement souligné qu'il était un peu gênant de recommander la sobriété à des gens qui vivent dans des appartements chauffés à 17 °C en hiver. Il me semble préférable de parler d'utilisation rationnelle de l'énergie, ce qu'ils comprennent bien et font déjà spontanément.

Int. : *Tout votre exposé s'inscrit dans une optique de croissance de la consommation. Pourquoi ne pas envisager une réduction forcée de celle-ci ?*

Y. B. : Je ne suis pas favorable à des restrictions autoritaires sur la consommation d'énergie, car je n'ai pas envie que mes enfants, mes petits-enfants et les générations suivantes vivent moins bien que moi, et cela sans raison, puisqu'il y a pléthore d'énergie sur cette planète. L'objectif doit être de s'en servir de façon rationnelle, en minimisant les impacts négatifs de cette utilisation, et en la distribuant équitablement entre tous.

Je ne suis cependant pas opposé à des mesures restrictives sur certains usages. Par exemple, on a eu raison de mettre en place une politique de suppression des ampoules à incandescence. D'autres mesures de ce type pourraient être mises en œuvre, à condition de le faire de façon claire, annoncée à l'avance et progressive. J'approuverais tout-à-fait, par exemple, que l'on interdise le chauffage des terrasses de café en hiver...

■ Présentation de l'orateur ■

Yves Bamberger : d'abord chercheur en mécanique des structures et professeur à l'École nationale des ponts et chaussées, il entre chez EDF aux Études et Recherches en 1980 pour contribuer aux applications de la simulation numérique, tout en continuant à enseigner à temps partiel. Ses fonctions successives dans les systèmes d'information, la production, et enfin comme directeur R&D d'EDF, de 2002 à 2010, le conduisent à être moteur de ce que l'on appelle maintenant la transformation numérique, puis à travailler sur le développement de l'électricité pour le développement durable. Auteur de livres et de films scientifiques, il est membre fondateur de l'Académie des technologies.

Diffusion avril 2022

**Retrouvez les prochaines séances et dernières parutions
du séminaire Management de l'innovation sur notre site www.ecole.org.**