

Face à l'urgence climatique, agir dès maintenant est-il possible ?

Entretien avec Yves Bamberger,
Membre de l'Académie des technologies de France

Propos recueillis par Jacques Horvilleur



moins carboné, tout en améliorant la vie des habitants des pays et des quartiers les moins favorisés et en conservant l'essentiel de la qualité de vie des autres ?

A cette question, votre ouvrage répond plutôt positivement mais, au moment où la production d'énergie reste encore largement émettrice de gaz à effet de serre et où de vastes régions du monde sont encore en attente d'un développement économique, n'est-ce pas une vision exagérément optimiste ? Est-ce vraiment réaliste et, notamment, disposons-nous de toutes les technologies nécessaires ?

REE : Vous venez, avec Teddy Püttgen, professeur honoraire de l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL), de publier un ouvrage très sérieux et documenté relatif à notre avenir énergétique. Cet ouvrage, intitulé « L'électricité au cœur de notre futur bas-carbone », aborde une question écologique et sociale cruciale, que l'on peut formuler ainsi : *Pouvons-nous aller rapidement vers un monde toujours*

Yves Bamberger : La réponse à ces questions nécessite sans doute une analyse par régions et types de pays mais, pour commencer, je voudrais rappeler deux points essentiels de natures différentes :

1. Il n'y a pas de problématique intrinsèque de quantité d'énergie disponible ; pour s'en convaincre, il suffit de se rappeler que l'énergie transmise par le soleil couvre 9000 fois nos besoins.

On peut donc dire que toutes les ressources naturelles de la terre sont limitées, sauf l'énergie puisqu'elle en reçoit constamment !

2. Sur le plan humain, il me semble très difficile d'expliquer à nos enfants et petits-enfants qu'ils devront vivre moins bien que nous et d'affirmer aux habitants de régions aujourd'hui moins développées que le confort et le développement économique ne sont définitivement pas à leur portée.

Le premier point a un corollaire que certains pourraient juger quelque peu provocateur : les économies d'énergie ne sont pas, en soi, un objectif à poursuivre. Ce qu'il faut, c'est satisfaire les besoins, y compris les besoins de développement, sans émission de GES, et le faire dans les meilleures conditions économiques possibles. De ce point de vue, par exemple, une surisolation des bâtiments n'est pas nécessairement à rechercher si l'énergie disponible est décarbonée ; c'est l'optimum économique qui doit alors conduire aux meilleurs arbitrages, en évitant, bien entendu, les gaspillages énergétiques.



●●● Reste maintenant la question, que vous posez à juste titre, des technologies disponibles et des progrès qui restent nécessaires. Il faut l'examiner secteur par secteur.

REE : Commençons donc, par exemple, par le secteur qui est le plus familier à chacun d'entre nous, celui de nos habitations.

Y. B. : Dans le secteur résidentiel, on a déjà beaucoup de solutions pour décarboner la consommation d'énergie à un coût acceptable. Ainsi l'eau chaude sanitaire est un des deux postes principaux de consommation énergétique dans nombre de pays. Les chauffe-eau électriques fournissent, en France, une eau chaude presque sans CO₂, néanmoins la moitié des chauffe-eau environ reste aujourd'hui à gaz. Ce problème n'est ni technique ni économique, mais plutôt d'ordre réglementaire et politique

Pour le chauffage (et la climatisation) des habitations individuelles, on dispose de la solution décarbonée de référence : la pompe à chaleur (PAC). Plutôt que de dépenser parfois des sommes considérables dans l'isolation, on devrait plutôt installer des PAC en substitution des chaudières au mazout ou à gaz ; sur le plan des émissions de gaz à effet de serre comme sur celui des particules fines, ce serait bien préférable. Même si des progrès se poursuivent sur les rendements, bien des solutions existent, avec ou sans subventions suivant les pays : chauffage solaire thermique, PAC réversibles, PAC géothermiques, etc.

Il y a certes d'autres solutions réputées « décarbonées », notamment celles qui reposent sur la combustion de la biomasse, dans le résidentiel comme dans le tertiaire, où on dispose d'appareils plus gros et plus perfectionnés. Mais est-il bien nécessaire de brûler du bois, ce qui émet à la fois CO₂ et particules ?

On a su, en 20 ans, éradiquer les ampoules de 100 W à incandescence ; on

doit faire de même pour les équipements utilisant la combustion de fossiles.

REE : Venons-en maintenant à un domaine plus divers, donc plus complexe : le secteur de l'industrie.

Y. B. : C'est effectivement plus complexe, car les solutions sont liées à chacun des procédés industriels. Souvenons-nous d'abord que 70 % de l'énergie consommée dans l'industrie sert à obtenir de la chaleur. Remplacer charbon, pétrole ou gaz par de l'électricité décarbonée, par exemple un four à gaz par un four électrique peut être la solution. Plus précisément, deux cas principaux sont à examiner.

Pour les procédés utilisant de la chaleur apportée par une combustion mais ne produisant pas par-eux-mêmes du CO₂, l'électricité est à considérer mais aussi le gaz (« vert ») et l'hydrogène décarboné à condition d'en disposer.

Dans d'autres cas, c'est le procédé lui-même qui produit du CO₂. C'est par exemple le cas de la production de ciment. La décomposition de la calcite produit du CO₂, difficile à utiliser directement en raison des quantités produites. Les solutions reposent sur le captage et le stockage du CO₂ (en anglais « CCS »), à moins de changer le procédé.

Dans tous les cas, une première action à mener consiste à récupérer autant que possible la chaleur dite fatale, celle qui résulte du procédé lui-même tel que mis en œuvre. Là aussi la pompe à chaleur peut être la solution, mais des progrès restent encore nécessaires, notamment sur les PAC de grande puissance ou à haute température.

Au final, le bilan des émissions sur la durée et la dimension économique sont d'autant plus importants que les installations industrielles sont couramment à durée de vie longue (50 ans ou davantage). Enfin, si des avancées technologiques sont toujours utiles dans tous les

domaines, c'est dans l'industrie qu'elles sont aujourd'hui le plus nécessaires.

REE : Nous n'avons pas encore évoqué le secteur du transport, qui est pourtant l'un des grands consommateurs d'énergie. En dehors des moyens de transport lourds, qui sont un créneau intéressant pour l'hydrogène, doit-on se contenter de la solution actuellement en développement, basée sur le moteur électrique et les batteries électrochimiques ?

Y. B. : Beaucoup de recherches ont été menées, et le sont encore, sur ces batteries, dont les performances et les coûts sont en perpétuelle amélioration. Ceci permet progressivement d'accroître l'autonomie et la vitesse de recharge des voitures électriques. Quant à la question de métaux dont la rareté constituerait un obstacle au développement du véhicule électrique, il ne me semble pas douteux qu'elle se résoudra par la diminution de l'utilisation de ces métaux rares par batterie, par le recyclage et par la découverte de nouveaux gisements. S'affranchir des limitations actuelles est d'autant plus important qu'il ne faut en effet pas oublier les avantages des voitures électriques par rapport à leurs homologues thermiques : les pollutions locales et le bruit sont plus faibles ; surtout, les émissions baissent avec le contenu en CO₂ de l'électricité servant à la recharge ; enfin, les moteurs électriques ont un rendement deux à trois fois plus élevé que leurs homologues thermiques, malgré les progrès considérables de ces derniers depuis plus cent ans !

Le véhicule à hydrogène, quant à lui, « émet » beaucoup par la préparation de l'hydrogène si celui-ci est produit à partir de gaz, ce qui, pour des raisons de coût, est le cas pour 95 % de l'hydrogène produit dans le monde actuellement. Quant à utiliser de l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau à partir d'électricité décarbonée, cela revient à faire un cycle électricité-hydro-

gène-électricité qui a un rendement de l'ordre de 40 %, largement inférieur à celui de la charge-décharge d'une batterie. Par contre le remplissage du réservoir est aujourd'hui plus rapide que la charge d'une batterie et l'autonomie du véhicule plus grande.

La décarbonation rapide du parc mondial des voitures, véhicules de livraison et autobus devrait donc avoir lieu via les batteries, celle des bus, des trains, des camions et des trains diesel via l'hydrogène.

REE : Pour réduire la quantité de dioxyde de carbone, il existerait une autre méthode, qui consisterait à le capter avant qu'il se répande dans l'atmosphère, ou éventuellement après qu'il a été dispersé. Voyez-vous cette éventualité comme une réponse significative au problème ?

Y. B. : Oui, cela doit faire partie de la solution. A la sortie de process industriels, ou de centrales thermiques à gaz, on sait le faire, et c'est urgent. La pénalisation croissante du relâchement dans l'atmosphère de CO₂ ou de méthane par un mécanisme de taxe ou de redevance devrait faciliter le déploiement de ces technologies : en effet, les technologies existent mais restent coûteuses : elles nécessitent en effet des installations spécifiques complémentaires de celles nécessaires au procédé dont on veut capter le CO₂ et aussi parce qu'elles peuvent en réduire le rendement (cas des centrales à gaz par exemple).

Quant à l'autre méthode que vous évoquez, elle consiste à aspirer l'air ambiant à l'aide de gros aspirateurs, à y capturer le CO₂ et à l'enfouir dans le sol ; c'est a priori plus cher du fait de la très faible concentration en CO₂. Certains y travaillent et des réalisations pilotes existent depuis peu.

REE : Tout ce dont nous venons de parler concerne principalement

les pays industrialisés et au climat tempéré. Que dire des pays « du Sud », au climat généralement chaud ?

Y. B. : Concernant ces pays, déjà avancés pour certains, moins avancés pour d'autres, nous devons travailler chaque fois qu'utile à l'adaptation des technologies à leurs conditions climatiques et besoins spécifiques. Il faut en particulier passer des « degrés-jours » de chauffage à ceux de rafraîchissement ou climatisation.

Sans détailler ici les nombreuses problématiques, une des priorités me semble être le développement du solaire thermique, qui connaît déjà de nombreuses applications (eau chaude sanitaire, chauffage, séchage). Bien entendu, la décarbonation de l'électricité est, comme dans les pays industrialisés, un objectif majeur.

REE : Venons-en donc à la question de la production d'électricité. Quelles évolutions voyez-vous pour notre mix électrique, voire pour le mix électrique mondial ?

Y. B. : Dans notre livre, nous n'avons pas pris position sur le mix de tel ou tel pays mais sur les technologies à prioriser pour la décarbonation en général. Je m'exprime ici à titre personnel. Le mix électrique français est déjà très décarboné grâce à l'hydraulique et au nucléaire. Il s'agit donc pour notre pays d'augmenter la production, conséquence hautement probable de l'électrification de nouvelles activités malgré les progrès de l'efficacité énergétique, et ce, sans dégrader le contenu en CO₂ moyen annuel de l'électricité que nous utilisons. Les estimations ne sont évidemment que des estimations, mais passer de 500 TWh annuels à 800 TWh en 2050 pourrait être nécessaire.

Pour moi, afin d'assurer au plus vite dans les trente ans qui restent jusqu'à 2050, la transition vers le « zéro-carbone », il

serait raisonnable de continuer à couvrir une bonne partie de la base par l'hydraulique et le nucléaire : utiliser en priorité les quelques ressources hydrauliques non encore valorisées (pour la production et aussi pour le stockage d'ailleurs), construire de nouvelles centrales nucléaires à production modulable pour pouvoir intégrer du solaire (de préférence sur les toits pour ne pas mobiliser d'espace) et de l'éolien assurant l'essentiel de l'augmentation des besoins. L'arrivée de technologies nouvelles au stade industriel pourra ouvrir de nouvelles possibilités le moment venu, par exemple de baisser le nucléaire actuel, mais cela ne me semble pas être la priorité du moment.

Au niveau mondial, les estimations sont plutôt un doublement des besoins. L'hydraulique a encore un grand potentiel de développement, mais ne peut tout assurer. Hydraulique, solaire, éolien et nucléaire, avec le moins de charbon et de gaz possible est le souhaitable, avec des proportions différentes d'un pays à l'autre !

REE : Vous avez rapidement évoqué l'hydrogène à propos de procédés industriels et du transport, mais la problématique de l'hydrogène est beaucoup plus complexe et plus large. Parmi les nombreuses questions posées, on peut retenir celles-ci :

- Comment le produire pour qu'il soit « vert » ?

- Ira-t-on jusqu'à des réseaux de transport de l'hydrogène sur le territoire, à l'instar de l'électricité et du gaz ?

- L'hydrogène doit-il être considéré d'abord comme un moyen de stockage de l'énergie ?

Y. B. : Comme dit précédemment, il existe déjà nombre d'utilisations de l'hydrogène dans l'industrie, mais il provient ●●●

●●● généralement de raffineries de pétrole ou de méthane. Il n'est donc pas adapté pour réduire les émissions. La priorité est de « verdier » l'hydrogène déjà utilisé puis d'étendre son usage dans l'industrie, dans le transport mais aussi pour le stockage de l'énergie.

La solution est de produire l'hydrogène par électrolyse à partir d'électricité décarbonée. Le rendement de l'électrolyse, même s'il progresse, est de l'ordre de 70 % : pour les applications, il faut mettre en balance usage direct de l'électricité et passage par l'hydrogène, besoin de stockage, etc. L'équilibre économique reste un point d'attention.

En résumé, même si l'hydrogène n'est pas la « solution-miracle », il est clair qu'il a des créneaux de développement qui pourraient, en France, représenter plusieurs dizaines de TWh. Une solution s'appuyant sur quelques tranches nucléaires dédiées, en base, à la production d'hydrogène, est certainement à examiner.

Sur la question de « réseaux d'hydrogène », on doit avancer prudemment. Il en existe déjà dans le Nord de l'Europe. Dans des zones très densément industrialisées, cela peut se justifier, pour autant, évidemment, que cet hydrogène soit produit à partir d'électricité décarbonée. Mais

aller plus loin, c'est-à-dire vers de grands réseaux en parallèle avec ceux de gaz et d'électricité nous éloignerait certainement de l'optimum sociétal. La production locale, proche des besoins, est une solution déjà expérimentée.

Une autre solution, déjà pratiquée parfois, a été imaginée, qui consiste à injecter un peu d'hydrogène dans les réseaux de gaz ; mais le pourcentage doit toutefois rester limité (quelque 10 %) en raison des risques d'explosion et de fuites du fait de la petite taille des molécules d'hydrogène.

REE : Certains voient aussi l'hydrogène comme un moyen de stockage de l'énergie, que ce soit en association avec des moyens de production intermittents ou, plus généralement, sur le réseau électrique. Est-ce réaliste ?

Y. B. : Techniquement, on sait le faire. Mais le rendement global d'un tel dispositif « électrolyse + compression et stockage de l'hydrogène + production d'électricité » est aujourd'hui compris entre 35 et 45 % ; les autres moyens de stockage (hydraulique, chauffe-eau, batteries, etc.) sont a priori bien plus efficaces. Le recours à l'hydrogène sera à envisager si ces autres moyens ne suffisent pas à répondre au besoin en France, ce qui pourrait être le

cas si on renonçait à l'énergie nucléaire. Le nucléaire civil est controversé, mais il présente l'avantage de produire beaucoup d'électricité décarbonée et en occupant relativement très peu de place. Et il a fait beaucoup moins de dégâts matériels et humains que bien d'autres technologies.

REE : Vous abordez là la question éminemment politique de l'avenir du nucléaire. En tant qu'énergéticien considérant la question climatique, que pouvez-vous en dire ? La mise au point de petits réacteurs « modulaires » (SMR) change-t-il, de ce point de vue, la donne, en particulier pour les pays qui n'ont pas encore développé de technologie nucléaire ?

Y. B. : Le point qui me semble fondamental est que nous sommes aujourd'hui dans l'urgence climatique et que, dans le même temps, nous ne pouvons pas nous permettre d'aller vers une pénurie d'électricité. Dans un pays comme la France, cela devrait se traduire par le lancement de la construction de nouvelles centrales dans une technologie éprouvée (tranches REP de l'ordre de 1 000 ou 1 200 MW par exemple).

Pour autant, la recherche de nouvelles filières nucléaires doit être encouragée, mais les constantes de temps sont importantes. Les SMR, comme sans doute les réacteurs nucléaires à sels fondus (MSR) font partie des réacteurs futurs mais ils ne sont pas encore au stade du développement industriel et il faut agir sans attendre 2030 ou 2035.

S'agissant des pays non nucléaires, il faut tenir compte de la question des compétences humaines et ne pas s'imaginer que, sous prétexte qu'ils sont de plus petite taille que nos centrales « classiques », les réacteurs pourraient être déployés rapidement dans ces pays, par exemple en substitution à des centrales à énergie fossile, dans des conditions raisonnables de sûreté. Quelle que soit la taille des réacteurs, l'implantation de la technologie



■ Station de transfert d'énergie par pompage (STEP) de Nant de Drance (Suisse).

nucléaire suppose de créer des compétences d'exploitation, de disposer d'une autorité de sûreté, etc. Cela prend du temps, sans doute une dizaine d'années voire plus.

REE : Parmi les questions que pose le développement des énergies renouvelables et, corrélativement, la réduction relative des moyens de production centralisés « classiques », figure celle d'une limite au-delà de laquelle le système électrique devient difficile à exploiter. Qu'en est-il, selon vous ?

Y. B. : Sans être un expert pointu de ces questions, il est couramment admis que, jusqu'à 30 ou 40 % d'énergies renouvelables intermittentes, il n'y a pas de problème de stabilité électrique du système ni de difficulté pour le suivi de la charge avec les technologies actuelles de contrôle du système électrique. Nous n'en sommes pas encore là pour le système européen interconnecté. Au-delà, il faudra soit disposer de suffisamment d'hydraulique et de nucléaire, soit développer fortement les diverses formes de stockage (en allant jusqu'à faire appel à l'hydrogène, mais il faudra le produire en augmentant encore plus la production d'électricité !), voire, à défaut, d'un parc de centrales à gaz, auxquelles on ferait appel le moins souvent possible. Concernant le stockage, d'autres solutions pourraient encore être développées : je pense notamment au CAES (air comprimé), mais dont le rendement n'est aujourd'hui que de 40 à 45 %, donc très inférieur à celui du stockage hydraulique (80 %).

Sur ces questions, le plus important est d'avoir une approche systémique, c'est-à-dire de regarder en même temps le côté consommation et le côté production, de prendre en compte les échelles de temps, et de faire des choix durables. Ma conviction est qu'il serait hasardeux de se passer du nucléaire, tant qu'on ne dispose pas d'ensembles solaire + éolien + stockage pouvant assurer économiquement la production de base.

REE : L'augmentation des prix des énergies, dont celui de l'électricité, est un sujet de mécontentement pour nos compatriotes et d'inquiétude pour les dirigeants, surtout si cette tendance devait s'avérer durable. Quelle est votre vision de la situation et de ses causes ?

Y. B. : Personnellement, je pense que la dérégulation en Europe est actuellement un échec. La concurrence devait faire baisser les prix de marché ; or c'est l'inverse qui a été observé ! Le découpage en tranches du secteur (production, transport, distribution, commercialisation) est une des raisons du phénomène, d'autant plus que la concurrence ne concerne qu'une petite partie de l'ensemble et que les coûts de transaction sont importants. Une seconde raison est liée aux subventions (tarif de rachat principalement) dont bénéficient les producteurs d'électricité éolienne ou solaire : au lieu de les financer sur les fonds publics puisqu'il s'agit d'une politique nationale, on les fait largement financer par les consommateurs d'électricité : paradoxalement, on augmente les factures d'électricité, alors qu'en même temps on veut promouvoir l'utilisation de l'électricité et avoir une société plus inclusive !

Le découpage en tranches du système présente aussi pour moi un risque majeur pour l'avenir : avec l'arrivée aux responsabilités de nouveaux dirigeants, qui n'ont pas l'expérience de l'ensemble du système électrique et qui sont souvent davantage politiques que techniciens, on peut craindre une perte de compétence des équipes dirigeantes. Aura-t-on à l'avenir suffisamment de gens compétents pour maîtriser le système ? Ce risque peut être très grave, s'agissant d'un service absolument vital pour toute la collectivité.

REE : Nous touchons là à des questions d'ordre politique. Dans le débat public, pensez-vous que les personnes qui connaissent le fonctionnement et l'économie du système

À propos

Yves Bamberger a d'abord été chercheur en mécanique des structures au Laboratoire central des ponts et chaussées et professeur à l'Ecole des Ponts. A la Direction des études et recherches d'EDF à partir de 1980, il y développe la simulation numérique. Dans ses fonctions successives, il est moteur dans la transformation numérique d'EDF. Directeur d'EDF R et D en 2002, il devient Conseiller scientifique du Président de 2010 à 2014. Il est l'auteur de plusieurs livres et films scientifiques. Yves Bamberger est membre fondateur de l'Académie des technologies.

électrique s'expriment suffisamment ?

Y. B. : Sans doute pas, et c'est d'autant plus dommageable que le personnel politique, en France spécialement, comporte peu d'ingénieurs. Comme en outre il n'existe plus de Commissariat au plan, et qu'ont été mises en place des agences « indépendantes », nous avons une organisation qui ne favorise ni la réflexion collective ni la cohérence de l'action de l'Etat, ni son agilité.

Cela dit, il conviendrait aussi que les « sachants » ne s'expriment que sur les sujets où ils ont une réelle compétence, et, pour être crédibles, sachent bien reconnaître le positif et le négatif en toute chose, ainsi que le certain, l'incertain et l'inconnu.

S'exprimer sur les questions d'évolution des grands systèmes socio-techniques, support de notre vie quotidienne, fait partie des missions des Académies, et notamment de l'Académie des technologies, à laquelle j'ai la chance d'appartenir depuis sa création. Leurs réflexions ont sans doute encore un poids insuffisant au niveau national, mais nous faisons en sorte de progresser... ■