

L'ÉNERGIE, SA PLACE DANS NOTRE VIE, QUELLE TRANSITION ?

Séance ordinaire du 2 décembre 2022
Communication de M. Michel Lebouché

L'histoire commence il y a environ 13,8 milliards d'années. Un événement unique se produit : l'apparition, je devrais dire la création, de l'espace-temps et de l'énergie. Dans un espace infinitésimal, parfois appelé « atome primitif » (dimension caractéristique 10^{-35} m) apparaît l'énergie totale de l'Univers. Cette énergie, qui nous préoccupe aujourd'hui, dans ce petit volume, peut être associée à une température $T=10^{32}$ degrés Kelvin (100 000 milliards de milliards de milliards de degrés). C'est le « Big Bang », universellement admis, après près d'un siècle de controverses à cause de ses implications métaphysiques.

Tout de suite (après 10^{-38} seconde) débute l'expansion de l'Univers, donc la chute de la densité d'énergie et le re-

froidissement rapide. C'est l'ère de l'inflation. Les particules élémentaires (la matière) apparaissent à 10^{-35} seconde : quarks, neutrinos, électrons. C'est l'ère des quarks. Entre 10^{-6} et 10^{-4} seconde, tous les protons et neutrons sont créés. C'est l'ère des hadrons, constitutifs des noyaux atomiques. Mais il fait trop chaud pour que ces noyaux puissent se constituer. Entre 1 seconde et 15 minutes se produit la nucléosynthèse totale des éléments légers : hydrogène H (75 %), hélium He (25 %), deutérium D (isotope de l'hydrogène) et lithium Li (traces). La quantité de matière, issue de l'énergie, est fixée. Entre 15 minutes et 380 000 ans, c'est l'ère des photons, très énergétiques et agités, qui empêchent la création d'atomes stables (noyaux + électrons). Il n'y a pas de lumière car les photons sont piégés. Mais à 380 000 ans,

l'expansion de l'Univers s'est poursuivie et donc la température est descendue à 3000 K. C'est encore une température élevée, mais à notre échelle. L'agitation s'est un peu calmée, les premiers atomes stables apparaissent, ainsi que la lumière (déplacement en ligne droite des photons libérés).

L'Univers devient transparent donc observable. Ce rayonnement émis de tous les points de l'Univers dans toutes les directions constitue ce qu'on appelle le rayonnement de fond cosmologique (CMB pour *cosmic microwave background*). Le temps passe... Les premières étoiles vont « s'allumer », des galaxies vont naître et disparaître, les éléments lourds du tableau de Dmitri Mendeleïev vont se former dans les poussières d'étoiles... et, à 9 milliards d'années, notre étoile (qui est de troisième génération), le Soleil, commence à se constituer. Aujourd'hui, après près de 14 milliards d'années, notre système solaire est constitué, avec notre Terre et notre vie.

L'Univers se répand toujours, se refroidit; les photons du CMB sont à 2,7 K; c'est la température du fond diffus cosmologique que photographient les télescopes et sur lequel rayonne notre Terre. Il refroidira par dilution, jusqu'à 0 K, sa fin, sa mort thermique.

Le soleil, source de notre énergie

Actuellement, pratiquement toute l'énergie que nous recevons vient du Soleil, par rayonnement électromagnétique : les photons. L'origine de cette énergie est la fusion thermonucléaire. Le Soleil consomme (brûle) 625 millions de tonnes d'hydrogène par seconde, qu'il

transforme en 620 millions de tonnes d'hélium. Les 5 millions de tonnes perdues lors de la fusion thermonucléaire correspondent à l'énergie que le Soleil rayonne dans l'espace, dont une petite partie pour la Terre. Chaque heure, le Soleil délivre à la Terre l'équivalent de la consommation annuelle de sa population. En conditions de rayonnement acceptables, la surface de la Terre reçoit de l'ordre de 1 kW/m^2 . Le rayonnement solaire est à 43 % dans le visible.

Que provoque ce rayonnement solaire ? Il provoque la croissance de la végétation, qui produit de la biomasse, source d'énergie par combustion. Le stockage est possible (bois, charbon, pétrole, gaz...). Il crée des gradients de température dans l'atmosphère, qui engendrent les gradients de masse volumique qui provoquent des mouvements de convection, donc du vent. Il n'y a pas de possibilité de stockage. Il provoque l'évaporation des mers, lacs et rivières, mais aussi des végétaux, qui produisent des nuages, engendrent la pluie, qui peut être stockée. Couplée à la gravitation, l'eau stockée est source d'énergie. La gravitation provoque aussi les marées donc les courants, également sources d'énergie. Il faut enfin citer l'énergie d'origine nucléaire, disponible sur Terre (fission, fusion, géothermie).

Il est habituel de classer les sources d'énergie en deux catégories :

- non renouvelables donc épuisables ; c'est le cas du pétrole, du gaz, du charbon et des combustibles nucléaires (au moins actuellement pour ces derniers). Ils sont stockables ;



- renouvelables; c'est le cas de l'éolien, du solaire, de la biomasse, de l'hydroélectrique, du géothermique, de l'énergie marine (due aux marées ou «hydraulienne»).

Les énergies hydroélectrique et issues de la biomasse sont stockables. Les autres non stockables, l'éolien et le solaire étant souvent aléatoires. Le plus souvent, l'énergie est produite sous forme thermique, utilisée sous cette forme ou transformée en énergie mécanique puis électrique, plus souple d'utilisation. Se posent alors les problèmes de rendement thermodynamique. Dans quelques cas – éolien, solaire photovoltaïque, hydroélectrique ou marin –, l'énergie est obtenue directement sous forme électrique (ou mécanique) et les problèmes de rendement ne sont plus cruciaux.

Définitions

Il est nécessaire maintenant de donner quelques définitions et unités. L'unité légale d'énergie est le joule. C'est une petite quantité d'énergie, qui n'intéresse que les spécialistes. Il faut 4,18 joules pour élever la température de 1 gramme d'eau de 1 degré. Les unités utiles pour le citoyen sont le kWh pour l'électricité, le litre pour l'essence, le baril pour le pétrole : 159 litres. Une ampoule à incandescence de 100 W consomme pendant dix heures 1 kWh, soit 3 600 000 joules. Dix litres d'eau chauffés de 20 °C à 100 °C exigent 0,93 kWh. Un litre d'essence produit par combustion 12 kWh. Au niveau du monde, on utilisera la tonne équivalent pétrole (tep), soit 12 000 kWh, ou plutôt la gigatep (Gtep), soit 12 000 TWh.

Il faut se familiariser avec les ordres de grandeur : kilo (K) = 10^3 , méga (M) = 10^6 , giga (G) = 10^9 , tera (T) = 10^{12} , peta (P) = 10^{15} , exa (E) = 10^{18} .

Il faut distinguer la consommation primaire d'énergie directement prélevée dans ou sur la Terre (par exemple le charbon), la consommation finale après transformation (par exemple l'électricité), la consommation utile, souvent inconnue (la part de lumière pour une lampe à incandescence). La consommation primaire annuelle est de 13,4 Gtep dans le monde et de 252 Mtep en France (1,9 %), ce qui coûte environ 66 milliards d'euros à notre pays, en conditions normales. La consommation finale est de 9 Gtep dans le monde et de 163 Mtep en France. On considère qu'un citoyen de la planète Terre consomme 1,3 tep par an, un Français 2,5 tep par an et un Américain 4,8 tep par an. Il existe un vrai gisement par économies. Mais attention ! le niveau de développement d'un pays est fonction croissante de sa consommation d'énergie et réciproquement. La corrélation est forte.

Un aspect important des sources énergétiques est la concentration pour certaines et la dilution pour d'autres. Ceci est le reflet de la hiérarchie des forces fondamentales qui leur donnent naissance. Elles conditionnent la consommation de combustible. Pour une puissance de 1000 MW fonctionnant à pleine charge (ordre de grandeur d'une centrale nucléaire), la consommation annuelle de combustible est de :

- 27 tonnes d'uranium pour une centrale nucléaire ;

- 2 millions de tonnes de charbon pour une centrale thermique ;
- 40 milliards de tonnes d'eau sous 100 m de chute (mais elle se renouvelle et ne produit pas de déchets) ;
- 172 milliards de m³ d'air à 60 km/h brassés par 700 éoliennes de 1500 MW (mêmes remarques que pour l'eau). Elles conditionnent aussi l'emprise au sol.

Pour assurer une production d'énergie de 1 TWh sur un an, la surface au sol nécessaire est de :

- moins de 0,1 km² pour une centrale thermique ou nucléaire ;
- 5 km² pour une centrale hydraulique ;
- plus de 5 km² pour des panneaux solaires photovoltaïques ;
- plus de 15 km² pour des éoliennes ;
- plus de 700 km² pour la biomasse.

Les critères du choix économique

Sur quels critères va-t-on évaluer le choix des filières énergétiques et envisager une transition énergétique ? À partir de la situation actuelle, les contraintes qui vont orienter le futur sont :

- les contraintes scientifiques liées à la balance entre besoins et réserves ou ressources, et à la souplesse d'utilisation ;
- les contraintes économiques, les coûts ;
- les problèmes d'environnement : pollution, déchets, effet de serre ;
- les contraintes politiques : indépendance énergétique, engagements vis-à-vis de partenaires ;
- les contraintes sociologiques : acceptabilité par le public.

Toutes sont importantes. Émergent actuellement l'indépendance énergé-

tique et les problèmes d'environnement qui conditionnent l'acceptabilité par le public. Certaines de ces contraintes impliquent des levers de verrous technologiques.

La situation actuelle

Quel est l'état actuel de la situation énergétique ? Sur les 13,4 Gtep de consommation dans le monde, 31 % proviennent du pétrole, 27 % du charbon, 24,7 % du gaz. Loin derrière, l'hydraulique apporte 6,9 %, les renouvelables 5,7 % et le nucléaire 4,3 %.

La consommation finale de 9 Gtep revient à l'industrie pour 29 %, aux transports pour 29 % et au résidentiel-tertiaire pour 29 %. Vingt pour cent sont consommés sous forme électrique, issue pour 35,1 % du charbon, pour 24,3 % du gaz, 16 % de l'hydraulique, 10,1 % du nucléaire, 5,9 % de l'éolien, 3,2 % du solaire et 2,9 % du pétrole. En 2021, on a constaté une légère évolution, pas très favorable, de la consommation électrique : 36,2 % issue du charbon, 9,9 % du nucléaire, 10,2 % du solaire et de l'éolien. Seulement 35,2 % de la consommation sont sans influence sur l'effet de serre ou la pollution atmosphérique.

En France, la situation est différente : 40 % de l'énergie primaire provient du nucléaire, 28 % du pétrole, 16 % du gaz naturel, 14 % des renouvelables (surtout grâce à l'hydraulique), 2 % du charbon. La France produit 55 % de cette énergie, dont 75 % issue du nucléaire. La baisse de production a été de 8,7 % en 2020. La consommation finale revient à l'industrie pour 19,3 %, aux transports pour 28,4 % et au résidentiel-tertiaire pour 48,4 %. Pour l'électri-



cité en 2019, qui pèse 25 % de l'énergie finale, 70,2 % proviennent du nucléaire, 11,2 % de l'hydraulique, 8,5 % du solaire et de l'éolien, 7,2 % du gaz naturel, 1,1 % du pétrole et 0,3 % du charbon.

Le critère environnemental

Pour la situation à venir, à moyen terme, la contrainte principale provient du réchauffement climatique associé à l'effet de serre. L'atmosphère est composée de 78 % d'azote, de 21 % d'oxygène et de traces variables de vapeur d'eau, entre 0,1 % et 1 %, d'ozone (O_3), de gaz carbonique CO_2 , de méthane CH_4 , d'oxyde nitreux N_2O , les trois derniers constituants étant générés en partie par l'activité humaine. On ne peut évidemment pas contrôler la concentration en eau dans l'atmosphère. La Terre reçoit le rayonnement solaire, filtré par cette atmosphère qui absorbe modérément, sauf par les nuages. Elle se réchauffe et réémet à son tour vers l'espace, mais à basse température, dans l'infrarouge. Ce rayonnement peut être partiellement absorbé par les gaz mineurs, ce qui contribue à un réchauffement de l'atmosphère. C'est l'effet de serre, qui est attribué à 60 % à la vapeur d'eau, à 26 % au gaz carbonique, à 8 % à l'ozone, à 6 % au méthane et à l'oxyde nitreux.

Sans effet de serre, la température moyenne de la Terre serait de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (peu confortable) au lieu de $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$, en léger accroissement et qui pose de redoutables problèmes climatiques. Cet accroissement est perceptible depuis le milieu du XIX^e siècle. Il est dû à l'activité humaine, à l'usage massif de la combustion, productrice de CO_2 , qui doit

être désormais utilisée avec modération. Les experts s'accordent à dire qu'il faut limiter l'accroissement de température à $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ d'ici la fin de ce siècle (il a été en France de $1,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ entre 1900 et 2020). L'accusé principal est le CO_2 . Or, le nombre de grammes d'équivalent carbone émis (pour l'ensemble du cycle de vie, y compris la construction) par kWh électrique produit est très variable suivant la filière de production : 220 g à 280 g pour le charbon, 120 g pour le cycle combiné à gaz, 16 g à 41 g pour le solaire photovoltaïque (hors stockage), 2 g pour le nucléaire, 1 g pour l'hydraulique, 1 g à 6 g pour l'éolien, mais 410 g pour la biomasse bois sans replantation.

Il faut souligner que la France ne pèse que pour 0,9 % dans la production mondiale de CO_2 . Pourtant, par sa position géographique, elle subit plus fortement le réchauffement climatique que la moyenne mondiale. Une modélisation récente laisse entrevoir en France un accroissement de température compris entre $2,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $6,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ d'ici la fin du siècle.

L'appauvrissement de la planète

Un autre critère important concerne l'appauvrissement en matières premières lié à la production d'énergie. À titre d'exemple, on n'obtient pas d'énergie électrique sans consommation de métaux et ceci est particulièrement vrai pour le renouvelable. L'hydroélectrique nécessite une vingtaine de tonnes d'acier par MW installé, le nucléaire une cinquantaine, l'éolien cent cinquante et le solaire photovoltaïque deux cent cinquante. Mais les deux der-

niers consomment en outre des quantités importantes de métaux critiques, rares et chers.

Les autres critères

Alors, quels points d'évolution ? On peut classer les activités consommatrices d'énergie primaire en France différemment : 28 % de l'énergie est constituée de pertes inutilisées, 28 % concernent le résidentiel-tertiaire, 20 % les transports et 14 % l'industrie. La préoccupation principale doit donc être la réduction des pertes :

- améliorer le rendement (thermodynamique) des centrales nucléaires en accroissement, notamment leur température de fonctionnement ;
- produire l'électricité autrement, plus directement. C'est le rôle des énergies renouvelables ;
- transporter l'électricité sans pertes. C'est l'espoir de la supraconductivité.

Autre point d'évolution prioritaire, réduire le poste de consommation du résidentiel-tertiaire. Le rôle du solaire pour le chauffage de l'eau sanitaire et des habitations est essentiel et doit être valorisé. Il faut aussi réduire la consommation dans les transports, la pollution et l'effet de serre. Il faut développer le ferroutage et utiliser un nouveau vecteur énergétique : l'hydrogène. Enfin, une contrainte vitale, qui prend actuellement une importance majeure, il faut rechercher l'indépendance énergétique.

Voyons comment se positionnent les différentes filières énergétiques dans ce contexte. Il est clair que, pour des raisons climatiques et de pollution, le

charbon-énergie est à prohiber et que la consommation des hydrocarbures (pétrole et gaz) est à optimiser, surtout pour la production d'électricité. Il convient d'optimiser la capture et la séquestration du CO₂.

L'éolien

L'éolien présente un développement mondial récent et rapide, surtout en Europe. Il ne représente toutefois que moins de 5 % de l'énergie électrique produite dans le monde et 7 % en France. Malgré son coût élevé, il est politiquement correct, car il n'émet pas de CO₂. On doit prendre en compte deux gros défauts des éoliennes :

- elles ne fonctionnent que de 1500 à 3000 heures par an. On peut compter sur environ 25 % de la puissance installée et ce, de manière largement imprévisible ;
- non stockable, l'énergie éolienne ne peut servir que d'énergie d'appoint et il convient de prévoir une autre source d'énergie pour 66 % à 83 % du temps. En France, cette source complémentaire ne peut être utilement que le nucléaire. L'énergie éolienne peut occuper quelques niches, dans les pays développés où elle complète ou remplace une énergie à combustible cher ou polluant ; dans les zones géographiques où le vent est régulier (alizés) et le prix du terrain peu élevé ; dans les zones isolées où le coût d'un réseau de distribution est prohibitif (le stockage, limité, peut se faire par batteries). Mais il faut admettre que l'énergie éolienne n'est pas adaptée à la fourniture massive d'énergie propre et ne sera pas en mesure de modifier la problématique énergétique mondiale.



Le solaire

Rappelons que le solaire est la principale énergie de base. On considère habituellement deux types d'énergie solaire : thermique et photovoltaïque. Le solaire thermique doit être privilégié pour le chauffage des habitations individuelles. Une maison de 100 m² reçoit en moyenne une puissance de plus de 30 kW d'énergie solaire, même dans le nord de la France ; on peut localement stocker cette chaleur. Brûler du gaz ou du pétrole pour assurer le chauffage de la maison et de l'eau sanitaire n'est pas économique ; utiliser exclusivement l'électricité est un non-sens énergétique. Optimiser les échanges thermiques entre une maison et l'extérieur en prenant en compte le rayonnement solaire est une nécessité.

Le solaire photovoltaïque est source d'électricité. Lorsqu'un flux de photons, émis par le soleil, frappe une surface métallique, il peut extraire des électrons des atomes et leur conférer une certaine énergie cinétique, fonction de la fréquence (énergie) des photons. Pour un semi-conducteur comme le silicium, il en résultera un courant extérieur utilisable. C'est l'effet photoélectrique. Le problème du photovoltaïque est son coût, lié au faible rendement des capteurs solaires et au coût d'élaboration des matériaux utilisés. S'il y a un avenir pour le photovoltaïque de puissance, ce sera dans les semi-conducteurs organiques. Des progrès sont en cours.

L'énergie de la biomasse

La nature stocke l'énergie solaire avec une grande efficacité. Elle nous

procure les principales sources d'énergie : végétaux (plantes et bois), hydrocarbures, charbon. On retient sous le nom de biomasse les plantes et bois, mais aussi la fermentation des déchets organiques ; c'est cette biomasse qui nous intéresse. Il existe quatre procédés pour extraire l'énergie de la biomasse.

La combustion (le bois énergie) : 50 % du bois mondial y est consacré. C'est la seule source d'énergie pour les populations rurales des pays émergents. Malheureusement, le souci de reforestation est insuffisant dans ces pays, en particulier dans les zones tropicales. La forestation mondiale est en régression. En Europe et particulièrement en France, la reforestation bien gérée permet d'en tirer une énergie réellement renouvelable, presque totalement thermique (4 % de l'énergie consommée en France).

La fermentation alcoolique de matières sucrées ou amylacées (canne à sucre, betterave, maïs), ou l'estérification d'oléagineux (colza, tournesol) donnent respectivement de l'éthanol et du biodiesel ajoutés à l'essence ou au gazole. Le rendement énergétique est de 1,4 kWh à 2 kWh par kWh consommé. Mais vaut-il mieux utiliser les surfaces agricoles pour nourrir les populations ou leur fournir du carburant ?

La transformation thermochimique du bois et des pailles produit un gaz de synthèse (H₂+CO) qui pourrait être utilisé comme carburant. C'est le meilleur rendement énergétique (2,5 kWh à 4 kWh pour 1 kWh consommé), mais qui demande encore beaucoup de recherches et développements.

Le biogaz est produit par des unités de méthanisation par fermentation sur les décharges, les stations d'épuration, les lisiers, les produits agricoles résiduels. C'est un procédé en fort développement en Europe. Il restera d'appoint, et l'injection du biogaz dans le réseau de gaz naturel ne sera possible que s'il est épuré (sa composition est fluctuante et le risque de corrosion élevé).

La géothermie

L'énergie géothermique est une énergie nucléaire qui provient de la désintégration des éléments radioactifs à longue période. Dans les parties stables du globe, l'énergie migre vers la surface par conduction (le flux de chaleur est de $0,06 \text{ W/m}^2$ et le gradient de température de $40 \text{ }^\circ\text{C/km}$). L'exploitation ne peut être que thermique. En France : Bassin parisien, Chaudes-Aigues, Soultz-sous-Forêt. Dans les zones actives, des fluides transfèrent l'énergie par convection (flux de chaleur de 1 W/m^2 et gradient de température de $300 \text{ }^\circ\text{C/km}$). L'exploitation peut être électrique ou thermique. Les zones volcaniques sont donc largement privilégiées.

L'énergie nucléaire

Si l'accroissement de la consommation d'énergie se poursuit, si les moyens massifs de séquestration du CO_2 ne sont pas développés rapidement, les énergies renouvelables contribueront à réduire l'écart entre demande et production, mais elles ne suffiront pas à combler seules cet écart, ni même à lutter suffisamment contre le dérèglement climatique. Quelle autre source d'énergie que le nucléaire pourra faire face aux besoins après 2030 en réduisant suffisam-

ment l'effet de serre ? Mais l'utilisation de l'énergie nucléaire exige une grande maîtrise scientifique et technologique. Et surtout, son acceptation par le public est difficile. L'image du nucléaire a été détériorée par les accidents de Tchernobyl et de Fukushima, ainsi que par leur exploitation par les lobbys antinucléaires. Le nucléaire se prête mal à un débat démocratique car le sujet est complexe. Le citoyen doit donc accorder sa confiance sur une information objective qu'il doit trier parmi des images souvent déformées de la réalité.

Quels sont les grands axes de production de l'énergie nucléaire ? D'abord, il existe trois familles de réacteurs ayant acquis de l'expérience. La plus large expérience concerne les réacteurs à neutrons thermiques – essentiellement maintenant les réacteurs à eau pressurisée (REP) – avec vocation à la production d'énergie. Au sein de barres de combustible radioactif U^{235} mélangé à U^{238} sont générées des réactions de fission qui produisent de grandes quantités de chaleur ; les barres sont refroidies par de l'eau liquide sous pression (circuit primaire) et cette eau, à haute température, apporte sa chaleur à un générateur de vapeur (circuit secondaire) ; cette vapeur alimente une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité. Ce sont les réacteurs français. À cause du fluide caloporteur, l'eau, qui ralentit les neutrons, les REP utilisent mal U^{238} ; ils produisent du plutonium (Pu) et des actinides mineurs (AM).

Une expérience plus modeste concerne les réacteurs à neutrons rapides (RNR), refroidis au sodium li-



quide. Ils valorisent les ressources en «brûlant» U^{238} (99,3 % des ressources en uranium). Il s'agit en France du réacteur expérimental Phénix et du réacteur industriel Superphénix. L'expérience concerne aussi les réacteurs à haute température (HTR) qui brûlent le plutonium accumulé et pourraient dans l'avenir produire de l'hydrogène par dissociation thermique de l'eau. Ils ont en outre l'avantage d'un bien meilleur rendement thermodynamique.

En prolongement des REP, la génération III concerne le réacteur pressurisé européen (EPR) d'une puissance de 1500 MW. Bénéficiant de la large expérience des REP actuels, elle innove sur des points essentiels :

- une sécurité accrue : protection contre une fusion accidentelle du cœur; résistance à la chute d'un avion gros porteur; résistance accrue aux séismes;
- une efficacité augmentée : meilleure utilisation du combustible MOX (mélange d'oxydes de plutonium et d'uranium appauvri), coût du kWh maîtrisé (incluant les améliorations sur la sécurité), durée de vie de soixante ans;
- des déchets réduits : l'EPR peut fonctionner avec 50 % de MOX au lieu de 30 %.

La génération III+ concerne le retour des réacteurs à neutrons rapides (RNR) dont l'intérêt majeur est, nous l'avons vu, de mieux utiliser la ressource en uranium naturel en brûlant U^{238} . Ils ouvrent la perspective d'un développement durable avec une énergie propre, la réserve actuelle se comptant en milliers d'années. La démonstration de faisabilité a été faite sur Phénix

et Superphénix. Les RNR ne sont pas aujourd'hui nécessaires, compte tenu de l'abondance et du bas prix de l'uranium, mais leur réapparition est inévitable dans l'hypothèse d'un développement général du nucléaire après 2030, d'où l'intérêt considérable du projet Advanced Sodium Technological Reactor for Industrial Demonstration (Astrid). La génération III+ concerne aussi les réacteurs à haute température (HTR) pouvant « brûler » le plutonium civil ou militaire, visant les marchés de 100 MW à 300 MW électriques et la production d'hydrogène par thermolyse.

La génération IV ou les avant-projets sur le papier :

- les RNR à gaz, inspirés de HTR mais à neutrons rapides ou intermédiaires. Ils exigent un combustible très enrichi et leur exploitation est délicate;
- les réacteurs hybrides, qui sont sous-critiques mais fonctionnent avec une source extérieure de neutrons, injectés par un accélérateur. Ils contrôlent très bien la réaction (sûreté accrue) et brûlent les actinides mineurs (AM); la durée de vie des déchets pourra ainsi être divisée par mille. Mais leur prix est environ double. Une start-up suisse, Transmutex, a déjà levé des fonds pour développer l'architecture du réacteur.
- il faut enfin mentionner les réacteurs à sels fondus, à combustible liquide servant aussi de caloporteur. Les produits de fission sont extraits en continu, ce qui accroît le taux de neutrons et permet de « brûler » U^{238} et les AM. Mais le confinement de la radioactivité est plus délicat. C'est la filière imaginée par le CNRS. Une start-up francilienne,

Naarea, s'attache au développement de ce type de réacteur, de faible puissance, 1 MW à 40 MW.

L'autre énergie nucléaire : les espoirs de la fusion

On peut espérer réaliser la fusion de deux façons : soit en comprimant très fortement une bille de combustible (deutérium ou mélange deutérium-tritium) à l'aide d'un ensemble de faisceaux laser ou d'ions lourds ; c'est la fusion inertielle (Livermore aux États-Unis et Mégajoule à Bordeaux) ; soit en confinant et en nourrissant le plasma correspondant par des champs magnétiques intenses ; ce sont les tokamaks (JET Fusion Laboratory à Oxford, au Royaume-Uni, Tore Supra au centre de recherche nucléaire de Cadarache, dans les Bouches-du-Rhône, Japon, Russie).

La fusion sera réussie si l'énergie libérée dans le plasma permet de dépasser l'énergie dépensée pour le former. Cela est possible si le produit (densité du plasma) $\times$ (durée de vie du plasma) $\times$ (température atteinte) dépasse un certain seuil, celui de l'ignition.

Les espoirs essentiels pour réaliser la fusion reposent sur la technologie tokamak. Elle a permis un gain de 107 pour le seuil en quarante ans et il manque un facteur inférieur à 10 pour assurer l'ignition. Celle-ci a même été atteinte pour des durées courtes. Ce sera le rôle du réacteur thermonucléaire expérimental international (ITER) en cours de construction au centre de Cadarache. Il faudra vraisemblablement encore quelque dizaines d'années pour atteindre le stade industriel en cas de succès. Mais le problème de la produc-

tion d'énergie sera résolu par la maîtrise de la fusion deuton-deuton, le deutérium étant abondant dans l'eau de mer.

Le vecteur hydrogène

Quelques remarques préalables : en combustion, le pouvoir calorifique de l'hydrogène est triple de celui de l'essence ; 1 kg d'hydrogène permet de parcourir 100 km, mais occupe 11 m³ à la pression atmosphérique. Dans les automobiles, il faut envisager le stockage sous pression (jusqu'à 900 bars). Sur les gros ensembles, il y a possibilité de liquéfaction de l'hydrogène, mais à -253 °C à la pression atmosphérique ; cette liquéfaction est très coûteuse en énergie.

Actuellement, l'hydrogène est fabriqué à 95 % à partir d'énergies fossiles (réformage du gaz naturel par de la vapeur surchauffée). Mais il est possible de le fabriquer par électrolyse de l'eau, ce qui en fait un moyen privilégié de stockage pour les énergies renouvelables, ou par thermolyse de l'eau à 800 °C-1000 °C. En France, il faut envisager 9 milliards d'investissements d'ici à 2030 pour l'installation de 6,5 GW, puissance nécessaire pour l'électrolyse (cinq tranches nucléaires). On peut également envisager différents moyens de bioproduction : gazéification de la biomasse, algues ou bactéries génératrices d'hydrogène...

Le stockage et la distribution d'hydrogène constituent un problème technologique sérieux. Pour l'automobile, on fabrique des réservoirs très résistants en matériaux composites (600 bars puis 800 bars) ; pour les gros ensembles et en particulier les avions, on envisage la liquéfaction très coûteuse en énergie et de conservation difficile. Pour le

transport, des gazoducs sont possibles (le gaz de Lacq contenait une forte proportion d'hydrogène). L'utilisation de l'hydrogène se fera dans les piles à combustibles (synthèse électrochimique de l'eau avec l'oxygène de l'air) ou par combustion directe dans les moteurs thermiques, réacteurs, voire moteurs de fusées. C'est un enjeu considérable.

L'élimination du gaz carbonique

On a vu que le principal problème d'utilisation des combustibles fossiles (charbon et hydrocarbures) résidait dans le rejet de CO₂ après combustion. Une solution est donc l'extraction du CO₂ des gaz de combustion et leur ségrégation dans le sol (gisements houillers inexploitable, réservoirs de gaz ou de pétrole épuisés, formations géologiques adaptées) ou au fond de la mer après refroidissement en neige carbonique (- 80 °C) pour former un lac de CO₂. Il s'agit là encore de recherches à fort enjeu.

Conclusion

On peut considérer qu'il n'y a pas de solution miracle. L'avenir passe par le déclin du charbon et du pétrole. L'avenir passe par les ressources limitées des énergies renouvelables. À moyen terme, l'éolien va se développer, surtout en mer. L'avenir passe en fait par des solutions complémentaires ajoutées les unes aux autres, du moins à moyen terme. À plus long terme, il sera indispensable de faire appel massivement au solaire et au nucléaire comme sources d'énergie, à l'hydrogène comme vecteur et moyen de stockage et... à l'efficacité énergétique et aux économies d'énergie, qui sont possibles dès aujourd'hui.

Pour ce qui concerne les énergies renouvelables, vedettes de la transition, il convient de les développer, même à leurs coûts élevés actuels. Il faut y consacrer beaucoup de recherche et développement. Il faut développer l'hydraulique dans les pays où subsistent des sites et penser à la mer. L'éolien maritime apportera un complément d'énergie verte, surtout en Europe. La contribution de la biomasse dans les carburants restera modeste. Sauf surprise, la géothermie restera marginale. Le solaire thermique pourra prendre une part significative dans le chauffage des bâtiments et participer ainsi aux économies d'énergie dans les pays de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE). Le solaire photovoltaïque rendra des services locaux isolés, subventionnés dans les pays en développement, mais son coût est encore loin de lui permettre un rôle significatif dans la problématique énergétique mondiale. 

BIBLIOGRAPHIE

G. COGNET, P. HESTO, J.-L. HOUZELOT, C. ROMBAUT, J. TAINE et B. TAMAIN, *L'Énergie au XXI^e siècle. Réflexion prospective*.

Conférences de B. TAMAIN et « Les enjeux de l'énergie ».

« L'énergie en France », site du ministère de l'Industrie  www.industrie.gouv.fr/energie.

Chiffres-clés de l'énergie, commissariat général au développement durable.

« Énergie nucléaire et environnement », Académie des technologies, 2019.

« L'apport de l'énergie nucléaire dans la transition énergétique, aujourd'hui et demain », Académie des sciences, 2021.

B. BIGOT, « La filière nucléaire ; interrogations et enjeux ».

Mémentos annuels sur l'énergie publiés par le Commissariat à l'énergie atomique (CEA).

Colloque « CNRS-Académie des technologies sur l'énergie », 2 octobre 2012.

M.-Y. BOLLORÉ et O. BONNASSIES, *Dieu, la science, les preuves*, éd. Guy Trédaniel, 2021.