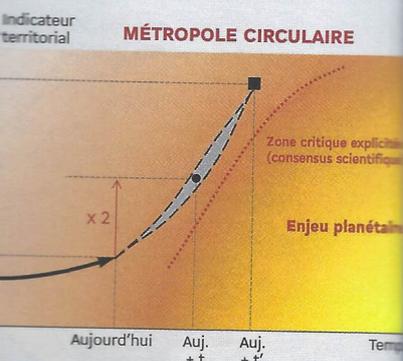


x planétaires :



chemin déjà parcouru (progression de 50 % de l'objectif) et nous sommes constamment à l'objectif (aujourd'hui, indicateur de l'amélioration ambitieuse et pertinente de l'indicateur) (cf. guide pour l'élaboration des PCAET), la dernière issue du consensus scientifique, même en l'état actuel.

eux identifiés aujourd'hui à l'échelle mondiale. Les conditions du développement sont majoritairement d'entre nous. C'est, bien sûr, à propos de nos territoires, et pas seulement partiellement notre responsabilité. Les énergies renouvelables, des solutions pour la réduction des insectes pollinisateurs et des antibiotiques.

La soutenabilité de l'espèce humaine au présent, dans notre monde, est un enjeu majeur pour les générations futures. Dans la réalité, sur ces enjeux, les territoires sont aujourd'hui confrontés à des défis. Le seul enjeu est dans notre capacité à relever ces défis, et à susciter les innovations nécessaires pour le réaliser, en substance. La révolution en jeu n'est pas une révolution technologique, mais une révolution

Le progrès technique, clef de la transition énergétique ?

Quelles technologies, pour quelles filières, à quel horizon temporel ?

Par Pierre Papon ¹

Si la réalité du changement climatique fait aujourd'hui l'objet d'un très large consensus scientifique, la façon dont nous pouvons y faire face, en revanche, n'est pas envisagée de la même manière par tout le monde. Comme dans toute crise de grande ampleur, les regards divergent suivant que l'on est du côté des pessimistes — qui envisagent le pire et vont parfois jusqu'à adopter des positions « survivalistes » — ou des optimistes — qui considèrent que l'on finira par s'adapter et trouver des solutions, notamment grâce au progrès technique. Ces optimistes convaincus du « solutionnisme technologique » ont-ils raison ? Le progrès technique sera-t-il au rendez-vous pour accompagner la transition énergétique ?

Dans ce deuxième volet de la série que Futuribles consacre aux questions climatiques et énergétiques, Pierre Papon examine les différentes voies ouvertes par le progrès technologique pour faire évoluer nos modes de production énergétique. Après avoir rappelé la lenteur (constatée historiquement) des transitions énergétiques, il souligne que la « dé-carbonation » de l'énergie est intimement liée à celle de la production électrique dont un élément clef concerne le stockage pour faire face à l'intermittence des énergies renouvelables. Il précise les différentes évolutions ou ruptures techniques envisageables en ce domaine, ainsi qu'en matière d'énergie nucléaire (qui fait partie des énergies non carbonées), l'horizon auquel elles pourraient se concrétiser (rarement antérieur à 2050) et les obstacles qu'elles pourraient rencontrer. Une incertitude majeure subsiste : comment réaliser la neutralité carbone de l'industrie ? En somme, un peu d'espoir, une longue attente... S.D.

1. Professeur honoraire de physique à l'École de physique et chimie industrielles (université Paris sciences et lettres, PSL), membre du comité de rédaction de *Futuribles* et conseiller scientifique de Futuribles International.

Le progrès technique, clef de la transition énergétique ?

La loi relative à l'énergie et au climat du 8 novembre 2019, a fixé un objectif ambitieux à la France — assurer la « neutralité carbone ² » en 2050 — que la nouvelle Commission européenne a, elle aussi, adopté pour l'Union européenne (UE). L'accord de Paris de 2015 prévoit de maintenir l'augmentation de la température moyenne de la planète, entre l'âge préindustriel et la fin du siècle, en deçà de 2 °C, et cet objectif ne peut être atteint qu'au prix de politiques volontaristes pour « décarboner » l'énergie, alors qu'en 2018 les énergies fossiles, fortement émettrices de CO₂ — la cause majeure du réchauffement climatique —, représentaient encore 80 % de l'énergie primaire mondiale ³. Selon les données récentes sur les émissions mondiales de CO₂, la planète serait sur une trajectoire conduisant, probablement, à une augmentation de 3 °C de sa température moyenne ⁴. On doit donc s'interroger sur la possibilité d'accélérer le processus de transition qui impose un rythme rapide de transformations socio-économiques, une baisse de la demande — la sobriété énergétique — et de l'intensité énergétique du produit intérieur brut (PIB).

Une prospective des techniques est nécessaire

Dans la préface du rapport 2019 de l'AIE, Fatih Birol, le directeur de l'Agence, soulignait qu'« il n'y pas de solutions simples pour transformer le monde de l'énergie. Des technologies et des filières multiples doivent jouer un rôle dans tous les secteurs de l'économie ⁵. » Il faut certes mobiliser un vaste arsenal de techniques énergétiques, mais peut-on espérer qu'un effort de recherche permettrait d'accélérer le progrès technique ? La prospective dans ce domaine est difficile. D'ailleurs, la quasi-totalité des scénarios énergétiques sont conservateurs : ils n'anticipent pas de ruptures techniques ni, *a fortiori*, de découvertes scientifiques qui changeraient la donne avant 2050. La prospective est ici d'autant plus difficile que l'histoire des techniques montre que leur progrès fut souvent non linéaire. Ainsi, en dépit de débuts prometteurs en

2. C'est-à-dire faire en sorte que les émissions de gaz à effet de serre par les activités humaines, principalement le CO₂, soient exactement compensées par leur absorption par les puits de carbone (forêts, sols, océans).

3. AIE (Agence internationale de l'énergie), *World Energy Outlook 2019*, Paris : AIE / OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), 2019. Selon son scénario le plus volontariste, les deux tiers de la production mondiale d'électricité seraient assurés, en 2040, par des énergies renouvelables. L'intensité énergétique baisserait de 3 % par an.

4. Selon l'AIE, les émissions de CO₂ liées à l'énergie n'ont pas augmenté en 2019, celles associées à la production d'électricité ont diminué de 1,2 %.

5. AIE, *op. cit.*

1900, la vo
raisons tec
tée par la v
de la batte
pour la voi
permettan
cet article,
dence, l'év
qui perme
tique de te
qu'il est di
concrétisa

Les tran

Dans une
souligne q
sont dérou
rythme de
cédent, av
l'énergie :
1990, avec
objectifs d
a été enga

L'histoire
niques éne
du XVIII^e
Watt, fonc
locomotiv
(les « Big E
progressiv
carburants

6. Une voiture
ses batteries, a
Achères en 188
réseau électriq

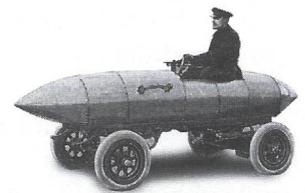
7. PAPON Pie
Futuribles, n° 4

8. BLAZQUEZ
to Navigate the
<https://www.o>
energy-transit

9. Cf. SMIL V
Mass. : MIT (M

Le progrès technique, clef de la transition énergétique ?

1900, la voiture électrique n'a pas pris alors son essor : pour des raisons techniques et économiques, elle a été rapidement supplantée par la voiture à essence ⁶. Un siècle plus tard, la mise au point de la batterie lithium-ion a changé la donne pour la voiture électrique, son utilisation permettant d'escompter son décollage. Dans cet article, nous envisagerons, avec prudence, l'éventualité de ruptures techniques qui permettraient à la transition énergétique de tenir son cap, tout en soulignant qu'il est difficile de fixer un horizon à leur concrétisation ⁷.



« La jamais contente », premier véhicule électrique à dépasser les 100 kilomètres à l'heure, 1899.

Les transitions énergétiques ont rarement été rapides

Dans une étude récente, l'Oxford Institute for Energy Studies souligne que « la plupart des transitions énergétiques du passé se sont déroulées sur une longue période de temps [...] Cependant, le rythme de la transition actuelle est censé être rapide, sans précédent, avec l'objectif de supprimer l'une des caractéristiques de l'énergie : les émissions de carbone. C'est au début des années 1990, avec le protocole de Kyoto [fixant aux pays développés des objectifs de réduction de leurs émissions de CO₂] que ce processus a été engagé ⁸. »

L'histoire des techniques conforte ce constat : le progrès des techniques énergétiques fut souvent lent ⁹. On observe ainsi qu'à la fin du XVIII^e siècle, la puissance des premières machines à vapeur de Watt, fonctionnant au charbon, était de 20 kilowatts (kW), celle des locomotives à vapeur a plafonné à 5 000 kW dans les années 1940 (les « Big Boys » de l'Union Pacific aux États-Unis). Le pétrole a pris progressivement le relais du charbon, à la fin du XIX^e siècle, les carburants pétroliers permettant le développement de l'automobile

6. Une voiture électrique, baptisée « La jamais contente » car il fallait recharger fréquemment ses batteries, a dépassé les 100 kilomètres à l'heure pour la première fois au monde, en France à Achères en 1899. Les batteries avaient alors une densité énergétique insuffisante et l'absence d'un réseau électrique sur un territoire était un sérieux handicap pour leur recharge.

7. PAPON Pierre, 2050 : quelles énergies pour nos enfants ?, Paris : Le Pommier, 2017 (analysé in Futuribles, n° 419, juillet-août 2017, p. 107-109).

8. BLAZQUEZ Jorge, FUENTES-BRACAMONTES Rolando et MANZANO Baltasar, A Road Map to Navigate the Energy Transition, Oxford Institute for Energy Studies, octobre 2019, p. 4. URL : <https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2019/10/A-road-map-to-navigate-the-energy-transition-Insight-59.pdf>. Consulté le 17 mars 2020.

9. Cf. SMIL Vaclav, Energy in Nature and Society: General Energetics of Complex Systems, Cambridge, Mass. : MIT (Massachusetts Institute of Technology) Press, 2007.

Le progrès technique, clef de la transition énergétique ?

après la Première Guerre mondiale, mais la part du charbon dans l'énergie primaire mondiale était encore de 26 % en 2018. L'énergie nucléaire n'a émergé qu'à la suite des recherches sur la structure de l'atome, au début du XX^e siècle, et la découverte du neutron et de la fission de l'uranium, à la fin des années 1930, n'a ouvert la voie aux premiers réacteurs électronucléaires que dans les années 1950, après le bombardement atomique d'Hiroshima en 1945. Et si l'effet photovoltaïque (une transformation de la lumière en énergie électrique) a été découvert au XIX^e siècle, l'acte de naissance de l'énergie photovoltaïque date, lui, de 1954, année de la mise au point aux États-Unis, dans les Bell Laboratories, de la première cellule solaire fonctionnant avec du silicium (avec un rendement de 6 %...) et la filière n'est devenue mature que très récemment.

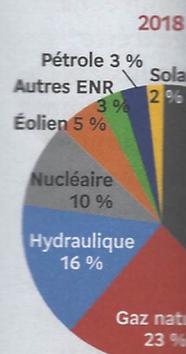
L'énergie n'est utilisable que par des processus de conversion permettant, par exemple, de transformer l'énergie solaire en électricité par l'intermédiaire d'un semi-conducteur. Une filière énergétique est un ensemble de techniques dont le rendement global assure la rentabilité économique. Ainsi, le développement mondial de l'électricité requiert d'une part un mode de production avec un bon rendement, et d'autre part la construction de réseaux électriques et de moyens de stockage, les matériaux jouant souvent un rôle clef.

Le futur sera-t-il électrique ?

En 2018, sur les 33 gigatonnes de CO₂ émis dans le monde en relation avec l'énergie, 40 % provenaient de centrales électriques : « décarboniser » (ou « décarboner ») l'énergie, la clef de la transition énergétique, n'est atteignable que si la production d'électricité est totalement décarbonée (elle l'est à 95 % en France), en substituant aux énergies fossiles les filières renouvelables (l'hydraulique, l'éolien, le solaire et dans une moindre mesure la bioénergie) et le nucléaire. Nous commencerons par envisager plusieurs hypothèses pour la décarbonation de l'électricité à l'aide des filières renouvelables.

L'énergie éolienne dans sa version terrestre est techniquement mature et elle produit, selon l'AIE, un kilowattheure (kWh) à un coût compétitif en Europe. Toutefois, l'emprise au sol des éoliennes n'étant pas négligeable, son développement sur certains territoires, notamment sur des terres agricoles, ainsi qu'au voisinage de zones protégées pour des raisons environnementales ou touristiques, commence à susciter de fortes oppositions, notamment en France. Quant à la filière *offshore* qui, selon l'AIE, deviendra compétitive au

Graphique 1. mondiale e



ENR : énergies renouvelables
CCUS : Carbon Capture and Storage
Lecture : le scénario de l'Accord de Paris ; le l'Agenda 2030 de l'ONU
Source : AIE, op. cit., p. 10

cours de l'actu
cité de produ
terrestre. Elle
gigantisme de
passer d'éolien
un diamètre d
20 MW avec u
matériaux des
vront avoir un
terrestre exige
tissement plus
tantes, envisag
La situation es
variantes de l'
principale, et
photovoltaïque
n'étant aujour
toutes les long

10. Ou thermodynamique...
duit de la vapeur alim
comme le Maroc et l
moyenne plus élevé e

11. On peut utiliser d
gallium, le sélénium
rendements sont plus

ique ?

mais la part du charbon dans
ore de 26 % en 2018. L'énergie
recherches sur la structure de
découverte du neutron et de
nées 1930, n'a ouvert la voie
ires que dans les années 1950,
Hiroshima en 1945. Et si l'effet
de la lumière en énergie élec-
l'acte de naissance de l'éner-
année de la mise au point aux
s, de la première cellule solaire
n rendement de 6 %...) et la
écemment.

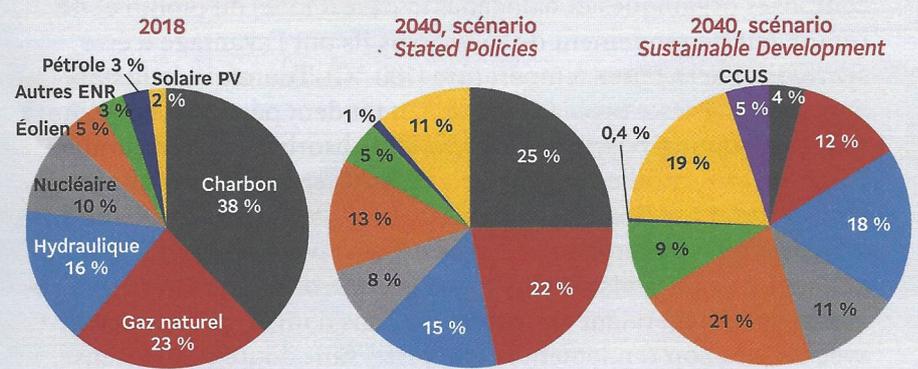
processus de conversion per-
l'énergie solaire en électricité
teur. Une filière énergétique
e rendement global assure
développement mondial de
ode de production avec un bon
ction de réseaux électriques et
t jouant souvent un rôle clef.

émis dans le monde en
ent de centrales électriques :
énergie, la clef de la transition
a production d'électricité est
% en France), en substituant
velables (l'hydraulique,
re mesure la bioénergie) et
r envisager plusieurs hypo-
ctricité à l'aide des filières

restre est techniquement
kilowattheure (kWh) à un
l'emprise au sol des éoliennes
ement sur certains territoires,
insi qu'au voisinage de zones
mentales ou touristiques,
tions, notamment en France.
AIE, deviendra compétitive au

Le progrès technique, clef de la transition énergétique ?

Graphique 1. Mix de la production d'électricité mondiale en 2018, et en 2040 selon deux scénarios de l'AIE



ENR : énergies renouvelables. PV : photovoltaïque.
CCUS : Carbon Capture, Utilization and Storage (capture, séquestration et valorisation du carbone).
Lecture : le scénario Stated Policies correspond aux politiques annoncées tenant compte des objectifs de l'accord de Paris ; le scénario Sustainable development est plus volontariste et prend en compte également l'Agenda 2030 de l'Organisation des Nations unies pour le développement durable.
Source : AIE, op. cit., p. 265.

cours de l'actuelle décennie en Europe, elle a une meilleure capacité de production, avec un impact territorial moindre que l'éolien terrestre. Elle doit faire face à un défi technique important : le gigantisme des turbines. Les constructeurs envisagent, en effet, de passer d'éoliennes offshore de 6 mégawatts (MW) de puissance avec un diamètre des pales de 150 mètres, en 2018, à des turbines de 15-20 MW avec un diamètre de pales de 230-250 mètres d'ici 2030. Les matériaux des pales de ces éoliennes, implantées loin de la côte, devront avoir une excellente résistance mécanique et leur connexion terrestre exigera une grande longueur de câble, et donc un investissement plus lourd ; leur installation sur des plates-formes flottantes, envisagée dans certains projets, apparaît très risquée.

La situation est à la fois ouverte et plus complexe pour les deux variantes de l'énergie solaire : la filière photovoltaïque (PV), la principale, et celle à concentration ¹⁰. Le rendement des cellules photovoltaïques au silicium, le semi-conducteur le plus utilisé, n'étant aujourd'hui que de 25 % au maximum (il n'absorbe pas toutes les longueurs d'onde de la lumière) ¹¹, peut-on escompter

10. Ou thermodynamique : le rayonnement solaire, en chauffant un fluide à l'aide de miroirs, produit de la vapeur alimentant une turbine ; cette filière est adaptée aux régions à fort ensoleillement comme le Maroc et la Californie. Le coût du kWh produit par la filière PV, pour sa part, est en moyenne plus élevé en Europe que celui de l'éolien terrestre (9,5 centimes d'euro sans le stockage).

11. On peut utiliser des cellules constituées de plusieurs semi-conducteurs comme l'arséniure de gallium, le séléniure de cuivre et d'indium, absorbant la majeure partie du spectre solaire ; leurs rendements sont plus élevés (40 %) mais leur coût aussi (elles sont utilisées pour les satellites).

Le progrès technique, clef de la transition énergétique ?

l'améliorer ? Des nouveaux semi-conducteurs, les pérovskites, des composés organiques et halogénés (à base d'iode) du plomb et de l'étain, ont un rendement de 22 %, mais ils ont l'avantage d'être synthétisables à basse température (100 °C). Toutefois, leur stabilité chimique reste problématique. Un tandem pérovskite-silicium serait une option possible, la pérovskite absorbant bien la lumière bleue et verte, qu'elle transforme en rayonnement infrarouge très bien absorbé par le silicium. Dans une cellule solaire, un électron est « produit » par un photon, mais celui-ci pourrait déclencher une avalanche de photons de plus basse énergie dans un matériau organique, qui délogeraient alors des électrons d'un semi-conducteur avec un très bon rendement ; cette piste, sans doute prometteuse, est explorée¹². Il ne faut sans doute pas escompter des augmentations substantielles du rendement des cellules solaires avant 2040 avec des techniques à bas coût ; les concurrents de la Chine, qui est leader mondial du solaire PV (une capacité de 176 gigawatts en 2018) avec la technique du silicium, disposent donc de quelques années pour innover afin de prendre pied sur les marchés, à condition qu'ils aient, en Europe, dans ce domaine comme dans d'autres, une stratégie industrielle.

Pallier l'intermittence : l'impératif du stockage de l'électricité

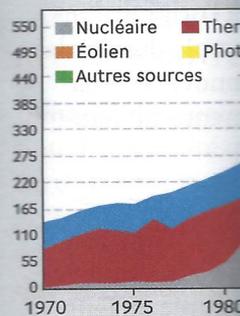
Les filières renouvelables (le solaire et l'éolien) produisant de l'électricité sont intermittentes, ainsi la production de la filière solaire photovoltaïque est-elle maximale en milieu de journée et nulle en soirée, lors de la pointe de consommation, et la nuit. Qui plus est, elles sont soumises à des aléas météorologiques¹³. Un réseau électrique dans lequel elles fourniraient une part importante de la puissance électrique devra donc être équipé de dispositifs de stockage qui seront d'autant plus nécessaires qu'une décentralisation substantielle de la production, assurée par des petites centrales locales de faible puissance, est prévue¹⁴. Il faudra donc transformer le réseau électrique, centralisé en France depuis le début du

12. LUTHER Joseph M. et JOHNSON Justin C., « An Exciting Boost for Solar Cells », *Nature*, vol. 571, 4 juillet 2019, p. 38-39. URL : <https://www.nature.com/articles/d41586-019-02014-8>. Consulté le 17 mars 2020.

13. Les performances de l'énergie marine (énergie mécanique des courants, des marées ou des vagues) étant aléatoires, sa contribution à la transition énergétique est considérée comme marginale. Celle de la géothermie est limitée à certaines zones géographiques (l'Islande en Europe, le Bassin parisien pour le chauffage urbain).

14. DAMBRINE Fabrice, « L'intermittence ne fait pas le printemps », *Books*, n° 105, mars 2020, p. 13.

Graphique 2. Prod d'électricité en



*Thermique à combustibles
 **Y compris énergie marémotrice
 Champ : France entière (y compris les DOM-OM)
 Source : Chiffres clés de l'énergie

XX^e siècle, pour le qu'il réponde à la

En France, aujourd'hui, les barrages (avec un stockage en batteries. Cette production (sauf en Afrique), indispensable aux véhicules à batterie lithium-ion est, au regard de l'énergie (150 v) produite lentement, des in

Remplacer dans les batteries le magnésium, le sodium et dans la cathode le lithium en est une autre. Des oxydes de lithium ont été testés : la densité de celle de la batterie au cobalt de la cathode où s'insère l'oxygène pour fonctionner à haute puissance stationnaire (il est

15. Le prix Nobel de chimie a été attribué à John Goodenough, qui a perfectionné la batterie au lithium, qui a mis au point en 1985

ique ?

ducteurs, les pérovskites, des
 base d'iode) du plomb et de
 ils ont l'avantage d'être
 °C). Toutefois, leur stabi-
 ité-silicium
 lumière
 très
 électron
 une
 orga-
 ctueur
 euse,
 menta-
 2040
 qui
 en
 iques
 à condi-
 autres,

stockage

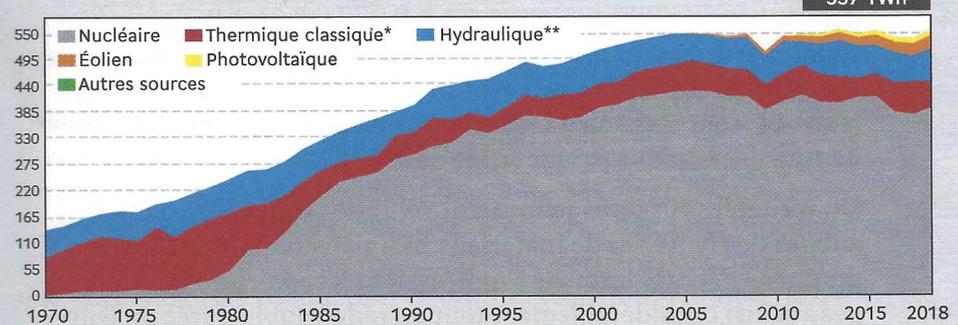
de l'élec-
 solaire
 nulle en
 plus est,
 réseau élec-
 de la puis-
 de stockage
 alisation
 par des petites centrales
 14. Il faudra donc transfor-
 France depuis le début du

Exciting Boost for Solar Cells », *Nature*,
www.nature.com/articles/d41586-019-02014-8.

anique des courants, des marées ou des va-
 énergétique est considérée comme marginale.
 ographiques (l'Islande en Europe, le Bassin
 printemps », *Books*, n° 105, mars 2020, p. 13.

Le progrès technique, clef de la transition énergétique ?

Graphique 2. Production nette d'électricité en France, 1970-2018 (en TWh)



*Thermique à combustibles fossiles (charbon, fioul, gaz naturel), biomasse ou déchets.
 **Y compris énergie marémotrice.
 Champ : France entière (y compris départements d'outre-mer).
 Source : Chiffres clés de l'énergie. Édition 2019, Paris : CGDD (Commissariat général au développement durable), 2019.

XX^e siècle, pour le rendre « intelligent » à l'aide du numérique afin qu'il réponde à la demande.

En France, aujourd'hui, 98 % de l'électricité est stockée dans des barrages (avec un pompage hydraulique) et à peine 2 % dans des batteries. Cette possibilité étant limitée, faute de sites disponibles (sauf en Afrique), les batteries constituent la technique clef, indispensable aux véhicules électriques pour lesquels la version lithium-ion est, aujourd'hui, le cheval de bataille mais, sa densité énergétique (150 wattheures par kilogramme) ne progressant que lentement, des innovations sont indispensables ¹⁵.

Remplacer dans les électrodes le lithium par un autre métal, le magnésium, le sodium et le zinc notamment, est une possibilité, et dans la cathode le cobalt, un métal lourd, par un autre matériau en est une autre. Des couples lithium-air (on produit et on dissocie des oxydes de lithium dans la batterie) ou zinc-air sont également testés : la densité énergétique du premier serait trois à quatre fois celle de la batterie lithium-ion, avec l'avantage de remplacer le cobalt de la cathode par du graphite, dopé avec un sel de lithium, où s'insère l'oxygène. Le couple sodium-soufre a l'inconvénient de fonctionner à haute température mais il conviendrait au stockage stationnaire (il est testé au Japon et par EDF [Électricité de France]

15. Le prix Nobel de chimie 2019 a été décerné aux inventeurs de la batterie lithium-ion : Stanley Whittingham, qui a réalisé chez Exxon, dans les années 1970, le premier prototype ; John Goodenough, qui l'a perfectionné en utilisant une cathode d'oxyde de cobalt et de lithium ; et Akira Yoshino, qui a mis au point en 1985, au Japon, une anode en carbone dans laquelle s'insèrent les ions lithium.

Le progrès technique, clef de la transition énergétique ?

à La Réunion). L'électrolyte est un élément critique d'une batterie (il permet la circulation des charges électriques entre les électrodes) ; dans la batterie lithium-ion où il est liquide, il fut à l'origine d'incendies. L'utilisation d'électrolytes solides (par exemple des oxydes et des sulfures métalliques de lithium) serait une innovation majeure, car tout en sécurisant les batteries, elle augmenterait leur densité énergétique et leur durée de vie ¹⁶.

De véritables ruptures pourraient venir de l'utilisation dans les anodes des batteries de matériaux bidimensionnels comme le graphène ¹⁷, entre lesquels s'inséreraient les ions lithium, les allégeant ainsi considérablement tout en réduisant la durée de leur charge, ainsi que de dispositifs de diagnostic d'usure prématurée et d'autoréparation (avec des composés organiques) intégrés dans les batteries ¹⁸. Compte tenu de l'importance de l'effort de recherche dans ce domaine, on peut escompter que des nouvelles générations de batteries (notamment tout-solides) seront sur le marché en 2030-2035.

La pile à hydrogène est une alternative à la batterie envisagée pour le stockage. Elle consiste à produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau ; celui-ci peut soit être transformé en méthane et injecté dans un gazoduc (la technique dite *power to gas*), soit alimenter une pile à combustible pour produire de l'électricité, par exemple en heure de pointe ¹⁹. Le rendement énergétique global de l'opération est au maximum de 60 % et elle n'est pas économiquement rentable. Seules l'amélioration du rendement de l'électrolyse et la découverte d'un nouveau catalyseur pourraient changer la donne ; les progrès ont été relativement lents



© Petrmalinak / Shutterstock

16. FAMPRIKIS Theodosios *et alii*, « Fundamentals of Inorganic Solid-state Electrolytes for Batteries », *Nature Materials*, vol. 18, 2019, p. 1278-1291.

17. Celui-ci est constitué d'une couche de carbone d'épaisseur monoatomique.

18. TARASCON Jean-Marie, « Les batteries sont-elles une bonne option pour un développement durable ? », intervention à la conférence « Face au changement climatique, le champ des possibles », Académie des sciences (Paris), 28-29 janvier 2020.

19. La pile à combustible réalise l'opération inverse de l'électrolyse de l'eau, en recombinaison l'hydrogène avec l'oxygène de l'eau à l'aide d'un catalyseur, le platine, un métal rare et donc coûteux.

dans ces
moyen te

Requie

L'énergie
tion d'éle
En dépit
accident
en Europ
que sa p
sur toute
Chine et

La filière
l'avenir d
(European
cours de
EDF) rel
sements
pour le r
réacteur
participa
génération
réacteur
mais ave
Fukushim
un inélu

La possi
vantes e
ments, e
consiste
60 MW.
de la déc
3 mètres
dans le s

20. RTE (Rése
drogène n'es
du carbone.
carbone. Ato

21. Ceux-ci d
22. Le gouver
six réacteurs

dans ces domaines, il est difficile d'envisager une percée décisive à moyen terme ²⁰.

Requiem ou Te Deum pour le nucléaire ?

L'énergie nucléaire de fission est une filière décarbonée de production d'électricité qui est l'une des options pour sa décarbonation. En dépit des fortes contestations dont elle est l'objet, depuis les accidents de Tchernobyl et de Fukushima (en 2011), notamment en Europe, l'AIE fait l'hypothèse, dans son scénario volontariste, que sa part dans la production électrique se maintiendrait à 10 % sur toute la période 2020-2040, avec une croissance importante en Chine et en Inde, et une baisse dans les pays développés.

La filière pose au moins trois questions. La première est celle de l'avenir du nucléaire dit de troisième génération, celle des EPR (*European Pressurized Water Reactors*) ²¹. La majorité des réacteurs en cours de construction dans le monde (en France, à Flamanville par EDF) relève de cette génération, mais avec des retards et des dépassements de coût importants (un quadruplement du devis initial pour le réacteur de Flamanville de 1 645 MW) ; toutefois, les deux réacteurs EPR (1 750 MW) construits en Chine à Taishan, avec la participation d'EDF, ont été connectés au réseau. L'avenir de cette génération est donc suspendu au retour d'expérience des premiers réacteurs ²². Les filières classiques produisent un kWh compétitif, mais avec l'inconvénient d'être très capitalistiques, l'accident de Fukushima ayant conduit à renforcer les normes de sécurité avec un inéluctable surcoût financier.

La possibilité de filières alternatives aux réacteurs actuels, innovantes en matière de sûreté et abaissant le coût des investissements, est la deuxième question que pose le nucléaire. Une option consisterait à construire en série des petits réacteurs classiques de 60 MW. L'entreprise américaine NuScale Power la testera au cours de la décennie. Chacun serait une tour de 20 mètres de haut et de 3 mètres de diamètre, immergée dans une piscine en béton creusée dans le sol. En assemblant sur un même site plusieurs unités, on

20. RTE (Réseau de transport d'électricité) estime que l'option du stockage de l'électricité via l'hydrogène n'est pas indispensable avant 2035, et n'est pas rentable en l'absence d'une forte taxation du carbone. Elle pourrait être considérée, au-delà de 2050. Voir *La Transition vers un hydrogène bas carbone. Atouts et enjeux pour le système électrique à l'horizon 2030-2035*, Paris : RTE, 2020.

21. Ceux-ci ont des systèmes de sécurité renforcés et opèrent avec un meilleur rendement.

22. Le gouvernement français a commandé à EDF, en 2019, une étude sur la possibilité de construire six réacteurs EPR pour un coût total de 46 milliards d'euros.

Le progrès technique, clef de la transition énergétique ?

construirait une centrale de puissance modulable à moindre coût²³. Les réacteurs de quatrième génération, appelés surgénérateurs, seraient une alternative. La fission y est déclenchée en bombardant le combustible, un mélange d'uranium et de plutonium, avec des neutrons rapides, le réacteur produit alors *in situ* de nouvelles charges de plutonium. C'est le grand intérêt de la filière car avec la surgénération du plutonium, on disposerait de plusieurs centaines d'années de réserve de combustible. Il en existe plusieurs variantes, l'une d'elles utilise le sodium liquide comme fluide caloporteur et une autre l'hélium²⁴. Les réacteurs à sels fondus sont aussi une alternative aux réacteurs actuels à uranium. Ils utiliseraient du thorium ou de l'uranium comme combustible, dissous dans des sels fondus de fluorures de lithium ou de béryllium servant à la fois de support à la fission et à évacuer la chaleur. Outre sa sûreté, supposée supérieure à celle des actuels réacteurs, cette filière utiliserait le thorium dont les réserves sont trois fois plus importantes que celles d'uranium, et produirait moins de déchets à vie longue²⁵.

Les perspectives de ces nouvelles générations ne sont pas encore claires et elles doivent apporter la preuve de leur sûreté avec un coût de production compétitif, l'horizon n'est probablement pas avant 2050. Si la sûreté et la compétitivité économique des réacteurs de faible puissance étaient assurées, un pays pourrait envisager de s'équiper de réacteurs d'une puissance de 100 à 300 MW, moins coûteux, pour conforter la production des filières intermittentes (l'éolien et le solaire). Ce serait une nouvelle donne nucléaire. Mais il n'est pas certain qu'une filière avec des petits réacteurs dispersés sur un territoire soit acceptée.

Le stockage des déchets nucléaires radioactifs provenant des combustibles usagés constitue la troisième question que pose le nucléaire et à laquelle il n'a pas encore été apporté de réponse définitive. La France a opté pour le stockage des déchets à haute et moyenne activité à vie longue dans un site souterrain, dans une

23. Le cœur d'un réacteur étant refroidi par une circulation d'eau par convection, on évite d'utiliser des pompes souvent à l'origine d'accidents (à Fukushima, elles s'arrêtèrent faute d'électricité). NuScale Power a été créée par le laboratoire fédéral d'Idaho et l'université d'État d'Oregon.

24. La France a construit quatre prototypes de surgénérateurs refroidis au sodium dans les années 1970-1980 (Rapsodie et Rachel, de basse puissance ; Phénix et Superphénix, de moyenne et haute puissance). Le CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) avait lancé la construction du prototype Astrid, d'une puissance de 600 MW, à Marcoule ; celle-ci a été arrêtée en 2019, compromettant ainsi l'avenir de la filière en France. Trois surgénérateurs fonctionnent dans le monde (deux en Russie et un en Chine).

25. Le combustible serait difficilement utilisable pour fabriquer une bombe atomique, la filière serait non proliférante.

RENDEMENT DES FILIÈRES

N.B. : les coûts de production actuels du kilowattheure donnés ici sont une moyenne pour l'Union européenne (source : rapport *World Energy Outlook 2019*, de l'Agence internationale de l'énergie, p. 274), ils sont très variables d'un pays à l'autre (il n'existe pas de production éolienne *offshore* en France), et entre l'Union européenne, les États-Unis, la Chine et l'Inde. Les chiffres donnés par les agences internationales ne sont pas toujours identiques.

Le rendement d'une filière énergétique est un facteur très important car il a une incidence directe sur le coût de l'énergie qu'elle produit. Il quantifie sa capacité à transformer une forme d'énergie dans une autre. Aujourd'hui, 80 % de l'énergie primaire est d'origine fossile : pétrole, charbon, gaz naturel. Leurs constituants chimiques sont carbonés avec une forte concentration d'énergie chimique (dans les liaisons entre atomes). Celle-ci est convertie en énergie thermique par combustion puis en énergie mécanique dans une machine thermique (moteur à essence, turbine à gaz...) dont le rendement énergétique dit « de Carnot » (rapport entre la quantité d'énergie produite et l'énergie consommée) ne dépend que de la température des sources chaudes et froides qui lui permettent de fonctionner. Dans le meilleur des cas, il est de 36 % pour les moteurs à essence et de 42 % pour les diesels. Le rendement global de turbines (couplées à un alternateur) de centrales électriques fonctionnant avec de l'eau supercritique (à haute température et forte pression) peut atteindre 50 %, et celui de turbines à cycle combiné associant gaz puis vapeur d'eau, près de 60 %. Le coût du kilowattheure produit par les centrales au charbon

et à gaz à cycle combiné est d'environ cinq centimes d'euro.

Les réacteurs nucléaires transforment la chaleur de la fission du combustible en électricité pour alimenter un générateur de vapeur couplé à une turbine, et celle-ci à un alternateur. Le rendement global des centrales nucléaires de la filière actuelle française est d'environ 33 %, celui de la filière EPR qui fonctionnera avec une vapeur d'eau à plus haute température serait de 36 %. Le rendement des réacteurs de quatrième génération, les surgénérateurs, pourrait être plus élevé dans leur version à très haute température (fonctionnant à 1 000 °C). Les réacteurs nucléaires actuels produisent un kilowattheure à 11 centimes d'euro.

Les cellules solaires photovoltaïques au silicium ont un rendement maximum de 26 % (avec des concentrateurs optiques de la lumière) pour transformer l'énergie lumineuse en électricité, mais elles ne la produisent à pleine puissance que lorsque l'ensoleillement est maximum (à 12 heures du temps solaire, elles reçoivent en France une puissance lumineuse d'un kilowattheure par mètre carré), et pas la nuit. Leur disponibilité est le rapport entre la production totale moyenne d'électricité sur l'année entière et celle qui serait produite à la puissance maximum (appelée puissance nominale ou crête). Elle est en France, en moyenne, de 15 %. Le coût de production (hors stockage et distribution) est de 9,5 centimes d'euro. Pour les éoliennes qui ne produisent pas en permanence pendant l'année,

Le progrès technique, clef de la transition énergétique ?

la disponibilité moyenne est, en France, de 25 % dans leur version terrestre, et serait de 40 % en version *offshore* (la situation est plus favorable sur le littoral où il y a presque toujours du vent), elle pourrait atteindre 50 % sur certaines côtes pour les filières avec des grandes hauteurs de mât. Le coût de production est de 8,5 centimes d'euro par kilowattheure pour l'éolien terrestre et de 11 centimes pour l'*offshore*.

Le rendement des moteurs électriques est excellent, il est en général de 90 % à 95 %. Le rendement électrique de la batterie lithium-ion à la charge l'est en général aussi (90 % lorsqu'elle est neuve), une partie de l'électricité étant perdue par chauffage par effet Joule. Celui des piles à combustible est bon, mais seulement de 60 %. ■

P.P.

couche d'argile²⁶. Une rupture technique dans ce domaine permettant de les transmuter en déchets à vie plus courte plus faciles à stocker est envisageable. Une technique est testée : elle consiste à irradier des déchets dans un réacteur avec un flux de neutrons émis par une cible en plomb, bombardée avec les particules d'un accélérateur. Un succès serait une véritable percée²⁷.

Le nucléaire n'a donc peut-être pas dit son dernier mot, d'autant plus qu'une option différente de la fission, celle de la fusion thermonucléaire, est l'objet du projet international ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*, proposé par l'URSS en 1985 !) pour tester sa faisabilité. Son objectif est de provoquer, dans un réacteur, la fusion d'isotopes de l'hydrogène (dont le tritium) à très haute température, qui dégage de l'énergie. Le réacteur ITER, en cours de construction en France à Cadarache, est un pari scientifique et technique. L'expérimentation avec du tritium pourrait avoir lieu dans les années 2030. Le succès d'ITER est loin d'être assuré, mais s'il entretenait une réaction de fusion de longue durée (plusieurs minutes) ce serait une rupture ; la décision de construire les premiers prototypes de réacteurs thermonucléaires électrogènes serait alors un scénario envisageable en 2050...

Le nucléaire pose certes beaucoup de questions, celle de sa sûreté n'étant pas la moindre en dépit du rôle de chiens de garde que

26. Option inscrite dans la loi Bataille sur le stockage des déchets nucléaires, votée en 1991. Un site a été choisi par l'ANDRA (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs), à Bure, à la limite de la Haute-Marne et de la Meuse, pour construire un laboratoire souterrain, à 500 mètres de profondeur.

27. Cette technique est testée dans le cadre du projet européen MYRRHA (*Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications*) au centre nucléaire belge de Mol, en coopération avec le CEA et le CNRS (Centre national de la recherche scientifique).

jouent des agences (ASN) en France, plus capitalistique développement-mobilisation de programmation plus inadaptée à la filie terme de grands

Pourra-t-on

L'électrification clef de la transition seule, tous les p Dans les transpo est la solution ra elle progresse, m de voitures élect L'électrification aérien et marin au point de batte et à un coût sign options de filière experts n'anticip méthane produi gaz couplées à de CO₂. Les tech

Certaines activit d'acier et de nom qués est consom et de chaleur fou la décarbonation matière premièr du carbone du c

28. L'ASN s'est forgé une agence de progression de NRC (Nuclear Regulatory Commission) alternant exigences de n par un juge fédéral. Au avant l'accident de Fukushima elle a été dissoute et remplacée par François, Nucléaire Ordonnance n° 402, septembre-octobre 2011.

29. Pour réussir la transition

ent des moteurs élec-
excellent, il est en géné-
à 95 %. Le rendement
de la batterie lithium-ion
est en général aussi
qu'elle est neuve), une par-
tricité étant perdue par
par effet Joule. Celui des
bustible est bon, mais
de 60 %. ■

P.P.

ce domaine per-
is courte plus faciles
testée : elle consiste
flux de neutrons émis
articules d'un accéléré.

rnier mot, d'au-
a, celle de la fusion
ional ITER (Interna-
posé par l'URSS en
st de provoquer, dans
e (dont le tritium) à
ie. Le réacteur ITER,
he, est un pari scien-
du tritium pourrait
ITER est loin d'être
sion de longue durée
écision de construire
nucléaires électro-
2050...

ns, celle de sa sûreté
ns de garde que

cléaires, votée en 1991. Un site a
radioactifs), à Bure, à la limite de
rain, à 500 mètres de profondeur.
MYRRHA (Multi-purpose hYbrid
ge de Mol, en coopération avec

jouent des agences publiques comme l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) en France, mais il faut aussi souligner qu'il est une filière plus capitaliste que les autres, avec des cycles (recherche-développement-construction) de longue durée, nécessitant la mobilisation de compétences techniques et industrielles²⁸. La Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), sur 10 ans, est donc inadaptée à la filière nucléaire, qui impose la planification à long terme de grands projets, dont la France a perdu la tradition²⁹.

Pourra-t-on encore utiliser du carbone ?

L'électrification croissante de l'économie est certes un objectif clef de la transition énergétique, mais elle ne peut résoudre, à elle seule, tous les problèmes que pose la décarbonation de l'énergie. Dans les transports routiers, le passage à la motorisation électrique est la solution radicale pour se passer des carburants pétroliers ; elle progresse, mais à rythme encore lent (un parc de deux millions de voitures électriques dans le monde, hybrides et tout-électriques). L'électrification est plus difficile à envisager pour les transports aérien et maritime ; son accélération dépend beaucoup de la mise au point de batteries à forte densité énergétique, à recharge rapide et à un coût significativement plus faible qu'aujourd'hui. Deux options de filières carbonées restent ouvertes, pour lesquelles les experts n'anticipent pas d'innovations majeures : l'utilisation du méthane produit à partir de déchets agricoles, celle de turbines à gaz couplées à un système de capture et de stockage des émissions de CO₂. Les techniques sont au point mais coûteuses.

Certaines activités seront difficiles à électrifier : la production d'acier et de nombreux métaux, de ciment et d'engrais ammoniacaux est consommatrice de carbone, dans un processus chimique et de chaleur fournie par une énergie fossile. Dans la sidérurgie, la décarbonation supposerait soit l'utilisation de ferrailles comme matière première dans des fours électriques, soit le remplacement du carbone du charbon par de l'hydrogène pour la réduction de

28. L'ASN s'est forgé une réputation de compétence et de grande rigueur dans ses avis, avec une exigence de progression de la sûreté. Il semble que ce soit aussi le cas de son homologue américaine la NRC (Nuclear Regulatory Commission), mais qui fonctionne selon un mode et un rythme différents, alternant exigences de régulation et leur contestation éventuelle par les opérateurs, arbitrée parfois par un juge fédéral. Au Japon, l'autorité de sûreté, sous la dépendance du ministère de l'Industrie avant l'accident de Fukushima, n'a fait preuve d'aucune vigilance ; déconsidérée suite à l'accident, elle a été dissoute et remplacée par une autre structure qui n'a pas fait ses preuves. Cf. LÉVÊQUE François, *Nucléaire On/Off. Analyse économique d'un pari*, Paris : Dunod, 2013 (analysé in *Futuribles*, n° 402, septembre-octobre 2014, p. 112-114).

29. *Pour réussir la transition énergétique*, Paris : Institut Montaigne, juin 2019.

Le progrès technique, clef de la transition énergétique ?

minerais (le carbone réagit chimiquement avec les oxydes de fer du minerai en captant leur oxygène : ils sont « réduits »). La synthèse de l'ammoniac par le procédé classique Haber-Bosch utilise de l'hydrogène produit à partir de gaz naturel, mais on pourrait

Tableau 1. Objectifs français en matière d'électricité et de chaleur renouvelables, dans le cadre de la PPE

| | Réalisé 2016 | Réalisé 2017 | Objectifs 2018 | Objectifs 2023 | |
|---|---------------|---------------|----------------|------------------|------------------|
| | | | | Fourchette basse | Fourchette haute |
| Électricité renouvelable (puissance en mégawatts) | | | | | |
| Éolien terrestre | 11 755 | 13 550 | 15 000 | 21 800 | 26 000 |
| Solaire photovoltaïque / thermodynamique | 6 808 | 7 690 | 10 200 | 18 200 | 20 200 |
| Hydraulique (y compris usine marémotrice et STEP*) | 25 371 | 25 449 | 25 300 | 25 800 | 26 050 |
| Éolien en mer posé | 0 | 0 | 500 | 3 000 | |
| Énergies marines (dont éolien flottant, hydrolien, etc.), hors usine marémotrice | 0 | 0 | ND | 100 | |
| Géothermie électrique | 1 | 1 | 8 | 53 | |
| Bois-énergie | 490 | 559 | 540 | 790 | 1 040 |
| Méthanisation | 125 | 147 | 137 | 237 | 300 |
| Déchets, biogaz de décharge et STEP | 848 | 864 | 1 350 | 1 500 | |
| Total | 45 398 | 48 260 | 53 035 | 71 480 | 78 243 |
| Chaleur et froid renouvelables (production brute en kilotonnes équivalent pétrole) | | | | | |
| Biomasse | 10 494 | 10 294 | 12 000 | 13 000 | 14 000 |
| Biogaz | 247 | 354 | 300 | 700 | 900 |
| Pompes à chaleur | 2 184 | 2 290 | 2 200 | 2 800 | 3 200 |
| Géothermie de basse et moyenne énergie | 145 | 170 | 200 | 400 | 550 |
| Solaire thermique | 101 | 102 | 180 | 270 | 400 |
| Total | 13 170 | 13 211 | 14 880 | 17 170 | 19 050 |
| dont quantités de chaleur et de froid renouvelables, et de récupération, livrées par les réseaux de chaleur et de froid | 1 114 | 1 180 | 1 350 | 1 900 | 2 300 |
| Injections de biométhane dans le réseau de gaz (en GWh) | 215 | 406 | 1 700 | 8 000 | |

*Stations de transfert d'énergie par pompage.

ND : données non disponibles.

Champ : France métropolitaine continentale (champ défini par la PPE). Les données relatives au réalisé 2016 et au réalisé 2017 pour la production de chaleur et de froid par filière portent toutefois sur l'ensemble de la France métropolitaine.

Source : Chiffres clés des énergies renouvelables. Édition 2019, Paris : CGDD, 2019.

L'obtenir par...
économique...
décarbonation...
dans un futur...
inévitables...
des alternati...
consisterait...
cation compl...
réaliste, en P...

L'industrie, e...
chimie pour l...
rel et le pétro...
possibles. La...
notamment...
en la transfo...
peut produir...
des polymère...
étant produi...
en monoxyle...
formique, wa...
et le nickel. L...
rique par la p...
prospective...
moyen des te...
thèse partiell...
des génome...
produisent d...
de l'éthanol e...
carburants. L...
deux à trois...
saires pour q...
au-delà de 20...
bonne atmo...
qui permettr...
agricoles san...

Conclusion du progrès

De nombreu...
tion énergéti...
Un effort de

l'obtenir par électrolyse de l'eau (un procédé au point mais peu économique). Quant à la fabrication du ciment, elle nécessite la décarbonation du calcaire (un carbonate de calcium) par la chaleur dans un four (on envisage un chauffage par micro-ondes) qui émet inéluctablement du CO₂ (850 kilogrammes par tonne). Les procédés alternatifs sont loin d'être au point et rentables ; l'arme ultime consisterait à capter et stocker les émissions de CO₂. L'électrification complète de l'industrie d'ici à 2050 n'est probablement pas réaliste, en France comme ailleurs.

L'industrie, enfin, ne dispose pas encore d'une alternative à la pétrochimie pour la fabrication des matières plastiques, dont le gaz naturel et le pétrole sont la matière première, mais plusieurs voies sont possibles. La première consiste à les remplacer par de la biomasse, notamment la cellulose ou la lignocellulose provenant de végétaux ; en la transformant en gaz de synthèse à très haute température, on peut produire de l'éthanol ou du méthanol utilisables pour produire des polymères. La deuxième est la voie électrochimique, l'électricité étant produite par une filière renouvelable, on transforme le CO₂ en monoxyde de carbone puis ce dernier en méthanol ou en acide formique, voire en éthylène, à l'aide d'un catalyseur comme le cobalt et le nickel. La biomasse étant produite à partir du CO₂ atmosphérique par la photosynthèse avec un mauvais rendement, une voie prospective consisterait à l'améliorer en aidant la nature, soit au moyen des techniques de la biologie synthétique (on réalise la synthèse partielle ou complète d'un génome), soit en reprogrammant des génomes de bactéries, de microalgues ou de plantes afin qu'elles produisent des enzymes, pour dégrader la cellulose, ou directement de l'éthanol et des corps gras, voire des hydrocarbures et donc des carburants. Les rendements de ces procédés sont encore faibles et deux à trois décennies de recherche, au minimum, seront nécessaires pour qu'ils débouchent à l'échelle industrielle, sans doute au-delà de 2050. Si les chercheurs parvenaient à transformer le carbone atmosphérique en composés chimiques, ce serait une rupture qui permettrait de l'utiliser à des fins énergétiques, industrielles et agricoles sans incidence climatique.

Conclusion : accélérer le rythme du progrès technique ?

De nombreux verrous techniques subsistent sur la voie de la transition énergétique, le stockage de l'électricité n'étant pas le moindre. Un effort de recherche et d'innovation peut les faire sauter, accé-

...types de fer
... La syn-
...-Bosch utilise
... mais on pourrait

...lectri-
...e cadre de la PPE

Objectifs 2023

| | |
|------------------|------------------|
| Fourchette basse | Fourchette haute |
|------------------|------------------|

| |
|--------|
| 900 |
| 3 200 |
| 550 |
| 400 |
| 19 050 |
| 2 300 |

... non disponibles.
... relatives au
... par filière portent toutefois

2020, 2019.

RECHERCHE, INNOVATION ET SOCIÉTÉ

La question que traite Pierre Papon dans cet article est essentielle car, face au défi de la transition énergétique, nous sommes assez spontanément enclins à nous demander si, par miracle, une source d'énergie autre que celles que nous connaissons aujourd'hui ne pourrait pas être trouvée et, à défaut, si l'émergence soudaine d'une nouvelle technologie ne pourrait tout à coup nous sauver.

Aucune prévision n'est certaine, notamment en raison de l'irruption possible de surprises, bonnes ou mauvaises : des miracles comme des catastrophes... Et les efforts consentis en faveur de la recherche comportent toujours un aléa ; nul ne peut donc être certain qu'ils débouchent sur des innovations techniques, ni en déterminer la date d'avènement, d'autant que bien souvent le rendement des recherches techniques dépend lui-même d'innovations sociales et organisationnelles (à commencer par l'apprentissage de recherches pluridisciplinaires), qu'en outre, les innovations les plus « disruptives » proviennent souvent de sources inattendues, de personnalités dérangeantes auxquelles on n'accorde pas toujours attention.

Et nul ne peut prévoir avec certitude à quel rythme ces innovations vont se diffuser, ni être certain des usages qui en seront faits : d'abord, parce qu'il est bien connu que leur diffusion dépendra d'une multitude de facteurs techniques, environnementaux, économiques, sociaux et culturels sur lesquels nos capacités d'anticipation sont limitées ; ensuite parce que les nouvelles technologies sont particulièrement ambivalentes, que leurs usages peuvent être très divers, et que ceux-là mêmes dépendent également de facteurs technico-économiques et socioculturels, voire éthiques et philosophiques.

À supposer que la technique propose, la société dispose : parfois elle freine la diffusion d'une pratique à laquelle on promet un avenir radieux (ainsi en fut-il du télétravail depuis presque 50 ans), parfois elle l'accélère de manière inattendue, par exemple en raison d'un phénomène imprévu comme la pandémie de Covid-19 vis-à-vis du même télétravail. Observons peut-être qu'il en va de même de la robotique dans les usines, de la télématique dans les bureaux, comme de la voiture électrique qu'évoque Pierre Papon... ■

Hugues de Jouvenel

lérant ainsi le rythme du progrès technique, mais le succès n'est pas acquis d'avance car il ne se commande pas. La saga que fut la mise au point de la pile lithium-ion, nobélisée en 2019, illustre bien que ce progrès est une suite plus ou moins rapide d'avancées et de déconvenues. La science et la technique ne détiennent pas, à elles seules, la solution aux problèmes que pose la transition énergétique, mais elles peuvent l'aider à tenir son cap. Dans cette perspective, il serait opportun que les scénarios climatiques

et énergétique compte des émissions de carbone à grande échelle, les filières à bas carbone énergétique³⁰.

Une politique ambitieuse est le possible et le nécessaire, un objectif souhaitable, mais réalisable, des scénarios techniques mix électrique et nucléaire à part majoritaire, réalisables, mais avec des émissions nucléaires d'électricité d'origine importants inattendus, il est très probable que portant une part dans bon nombre de scénarios même pour ce qui est de la part de la production d'électricité ne permettant pas de couvrir l'intégralité de tous les scénarios en œuvre de la transition (des terres rares, de l'éolienne, le recyclage ne peut être que partiel) énergétique ne peut être que partiellement tranquille. ■

et énergétiques, ainsi d'ailleurs que la PPE en France, tiennent compte des évolutions possibles des techniques. La taxation du carbone à grande échelle serait une incitation forte à développer les filières à bas carbone, à condition de prendre en compte l'équité énergétique³⁰.

Une politique énergétique est un arbitrage entre le souhaitable, le possible et l'acceptable. La décarbonation de l'énergie est un objectif souhaitable pour des raisons climatiques. Plusieurs scénarios techniques sont possibles, mais avec des incertitudes pour le mix électrique ; c'est le cas : 1) d'un scénario à la française, avec une part majoritaire du nucléaire complétée par des filières renouvelables, mais avec des questions importantes sur l'avenir des générations nucléaires et le sort des déchets ; 2) d'une option avec une électricité d'origine renouvelable à 100 %, mais avec des risques importants inhérents à l'intermittence. S'agissant de l'acceptable, il est très probable que les scénarios avec un mix électrique comportant une part importante de nucléaire ne seront pas acceptés dans bon nombre de pays pour des motifs de sûreté. Il en va de même pour ceux avec une très forte dose d'électricité renouvelable ne prenant pas suffisamment en compte les risques que fait courir l'intermittence à la sécurité de l'offre. Ajoutons, enfin, que tous les scénarios impliquant les énergies renouvelables mettent en œuvre des techniques utilisant des métaux dits « critiques » (des terres rares comme le néodyme dans les aimants des turbines d'éolienne, le lithium et le cobalt dans les batteries, etc.) pour lesquels soit il n'existe pas encore de substituts, soit les techniques de recyclage ne sont pas au point. L'avenir technique de la transition énergétique est encore ouvert, mais il ne sera pas un long fleuve tranquille. ■

30. PERTHUIS Christian (de), *Le Tic-tac de l'horloge climatique. Une course contre la montre pour le climat*, Louvain-la-Neuve : De Boeck supérieur, 2019 (analysé en p. 141 de ce numéro).