

Vaclav Smil

Beaucoup espèrent un passage rapide aux énergies renouvelables. Mais l'histoire des transitions énergétiques montre qu'elles nécessitent deux à trois générations.



Énergies renouvelables :

L'ESSENTIEL

■ Les transitions énergétiques majeures – du bois au charbon, puis du charbon au pétrole – ont pris chacune 50 à 60 ans.

■ L'abandon des ressources fossiles et le passage aux énergies renouvelables ne devrait pas être plus rapide. Dans les pays industrialisés, les énergies renouvelables classiques, telle l'hydroélectricité, sont déjà utilisées au maximum.

■ On pourrait toutefois accélérer la transition, notamment en réalisant des économies d'énergie.

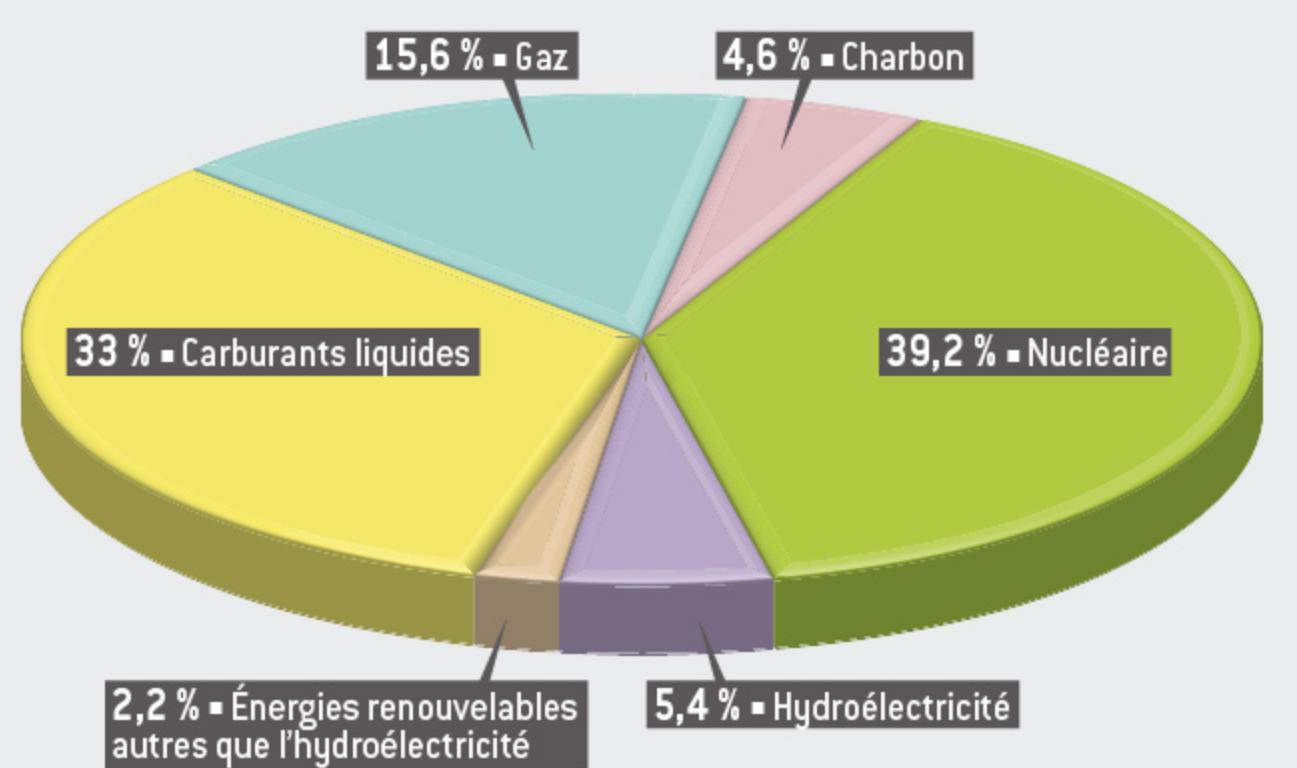


l'essor sera lent

I y a près de 40 ans, l'écologue américain Amory Lovins affirmait qu'en l'an 2000, 33 pour cent de l'énergie produite aux États-Unis proviendrait de sources renouvelables nombreuses, petites et décentralisées. En 2008, Al Gore, l'ancien vice-président, jugeait réalisable le passage de ce pays à 100 pour cent d'énergies renouvelables en une décennie, et ce à un coût abordable. En 2009, Mark Jacobson, de l'Université Stanford, et Mark Delucchi, de l'Université de Californie, à Davis, présentaient un plan pour effectuer une telle transition à l'échelle mondiale d'ici 2030.

Cependant, de 1990 à 2012, la part des combustibles fossiles dans la consommation d'énergie mondiale a à peine changé, passant de 88 à 87 pour cent. En 2011, les sources renouvelables ont fourni moins de dix pour cent de l'énergie des États-Unis, et il s'agissait pour la plupart de sources classiques, telles que les centrales hydroélectriques et le bois. Après plus de 20 ans de développement subventionné, les «nouvelles» sources d'énergie renouvelable, tels l'éolien, le solaire et les biocarburants, ne représentaient que 3,35 pour cent de l'approvisionnement énergétique des États-Unis.

La lenteur de cette transition énergétique n'est pas surprenante. En fait, elle était prévisible. Partout dans



LE BOUQUET ÉNERGÉTIQUE FRANÇAIS (ici en 2012) est dominé par le nucléaire. Les énergies renouvelables, pour l'essentiel sous forme d'hydroélectricité, n'en représentent que 7,6 pour cent. Dans ces chiffres livrés par le Service statistique de la Société BP, les biocarburants sont comptés dans les carburants liquides et non dans les énergies renouvelables (ils représentaient un peu moins de un pour cent de la consommation énergétique française en 2011, selon les données du Service de l'observation et des statistiques). En outre, le bois n'est pas pris en compte (3,7 pour cent de la consommation énergétique française en 2011). À l'échelle mondiale, en 2012, le charbon et le gaz représentaient chacun environ 30 pour cent du bouquet énergétique, le gaz 24 pour cent, le nucléaire 4 pour cent et les énergies renouvelables 9 pour cent.

le monde, chaque transition majeure entre deux combustibles a pris de 50 à 60 ans. Un passage du bois au charbon s'est d'abord produit, puis le pétrole est devenu prédominant. Aujourd'hui, les États-Unis connaissent une troisième transition énergétique majeure, du charbon et du pétrole vers le gaz naturel. Entre 2001 et 2012, les consommations américaines de charbon et de pétrole brut ont chuté respectivement de 20 pour cent et de 7 pour cent; dans le même temps, la consommation de gaz naturel a augmenté de 14 pour cent. Cependant, une décennie ou deux seront encore nécessaires avant que le gaz ne dépasse le charbon, qui fournit plus du tiers de l'électricité des États-Unis.

Les énergies renouvelables ne « décollent » pas plus vite que les nouveaux combustibles autrefois, et il n'y a aucune raison technique ou économique de penser qu'elles vont le faire. La demande énergétique mondiale augmente notablement, au point qu'il est déjà difficile de la satisfaire avec les sources d'énergies traditionnelles. Cela le serait encore plus avec les énergies renouvelables.

Le changement peut être plus rapide dans certains pays, mais, à l'échelle mondiale, le passage aux énergies renouvelables sera lent, en particulier si la conversion au gaz naturel se confirme. Bien sûr, il est possible qu'une technologie innovante ou

une décision politique accélère ce changement. Il reste qu'en général, les transitions énergétiques prennent du temps.

L'espoir d'une transition rapide et radicale vers les énergies renouvelables résulte d'une méconnaissance de l'histoire des deux derniers siècles. La plupart des gens pensent qu'au XIX^e siècle, où s'est produite une industrialisation rapide, la consommation énergétique mondiale a été dominée par le charbon, que le XX^e siècle a été l'ère du pétrole, et que le siècle actuel sera celui des énergies renouvelables. Les deux premières opinions sont fausses, la troisième discutable.

Même avec l'essor des machines industrielles, le charbon n'était pas la source d'énergie dominante au XIX^e siècle. Le bois, le charbon de bois (à ne pas confondre avec le charbon – la houille –, qui est une roche sédimentaire) et les résidus de céréales (principalement de la paille) ont fourni 85 pour cent de l'énergie mondiale consommée pendant cette période – soit environ 2,4 yottajoules (un yottajoule, YJ en abrégé, vaut 10^{24} joules).

Le charbon a commencé à représenter plus de cinq pour cent de l'énergie consommée vers 1840, et en 1900 il n'assurait encore que la moitié de la production. Cette augmentation de 5 à 50 pour cent a donc pris de 50 à 60 ans. Aux États-Unis, il fallut attendre 1885 pour que les combustibles fossiles (surtout du charbon, un peu de pétrole et une très faible quantité de gaz naturel) fournissent plus d'énergie que le bois et le charbon de bois. La bascule s'est produite en 1875 en France et en 1901 au Japon, mais seulement en 1930 en Union soviétique, en 1965 en Chine et à la fin des années 1970 en Inde.

De même, au XX^e siècle, la plus importante source d'énergie n'était pas le pétrole, mais le charbon. Ce dernier a culminé à environ 55 pour cent de la production énergétique mondiale au cours des années 1910. Le pétrole, déjà utilisé à cette époque, ne l'a dépassé qu'en 1964. Et comme ce déclin relatif s'est accompagné d'une augmentation constante de la demande mondiale d'énergie, le charbon a continué à être très utilisé. Finalement, c'est lui qui a fourni le plus d'énergie au XX^e siècle : environ 5,3 yottajoules, contre 4 yottajoules pour le pétrole.

Seuls deux pays importants sur le plan économique ont réalisé la troisième transition, celle du pétrole au gaz naturel. La

Même avec l'essor des machines industrielles, le charbon n'était pas la source d'énergie dominante au XIX^e siècle.

consommation de ce dernier a dépassé celle de pétrole brut en Union soviétique en 1984, et au Royaume-Uni en 1999.

Pour montrer que les transitions énergétiques sont lentes et progressives, j'ai étudié la vitesse à laquelle les sources d'énergie ont progressé, à partir du moment où elles atteignaient cinq pour cent du bouquet global. Les trois transitions successives présentent des similitudes notables (*voir l'encadré ci-dessous*). Ainsi, de 1840 à 1900, la part du charbon a évolué à une vitesse voisine de celle du pétrole entre 1915 (année où il a atteint cinq pour cent) et 1975. Le gaz naturel a fourni cinq pour cent de l'énergie mondiale vers 1930 et devrait bientôt en représenter 33 pour cent. Des trois combustibles, c'est celui qui a pris le plus de temps pour atteindre 25 pour cent de la consommation énergétique : environ 55 ans, contre 35 ans pour le charbon et 40 ans pour le pétrole.

Bien sûr, les trois séquences ne permettent pas de déduire le rythme des transitions énergétiques futures. Et la transition suivante pourrait être accélérée par une percée technologique vers une énergie nucléaire sûre et bon marché ou vers un dispositif de stockage massif de l'énergie d'origine éolienne ou solaire.

Deux ou trois générations pour une transition

Cependant, le fait que les trois premières transitions énergétiques se soient effectuées à un rythme similaire est remarquable, en particulier parce que les techniques d'extraction, les canaux de distribution et les machines utilisatrices (tel un moteur de train) varient notablement d'un combustible à l'autre. À l'échelle mondiale, les investissements et les infrastructures nécessaires pour qu'une nouvelle source

d'énergie s'impose requièrent deux à trois générations, soit 50 à 75 ans.

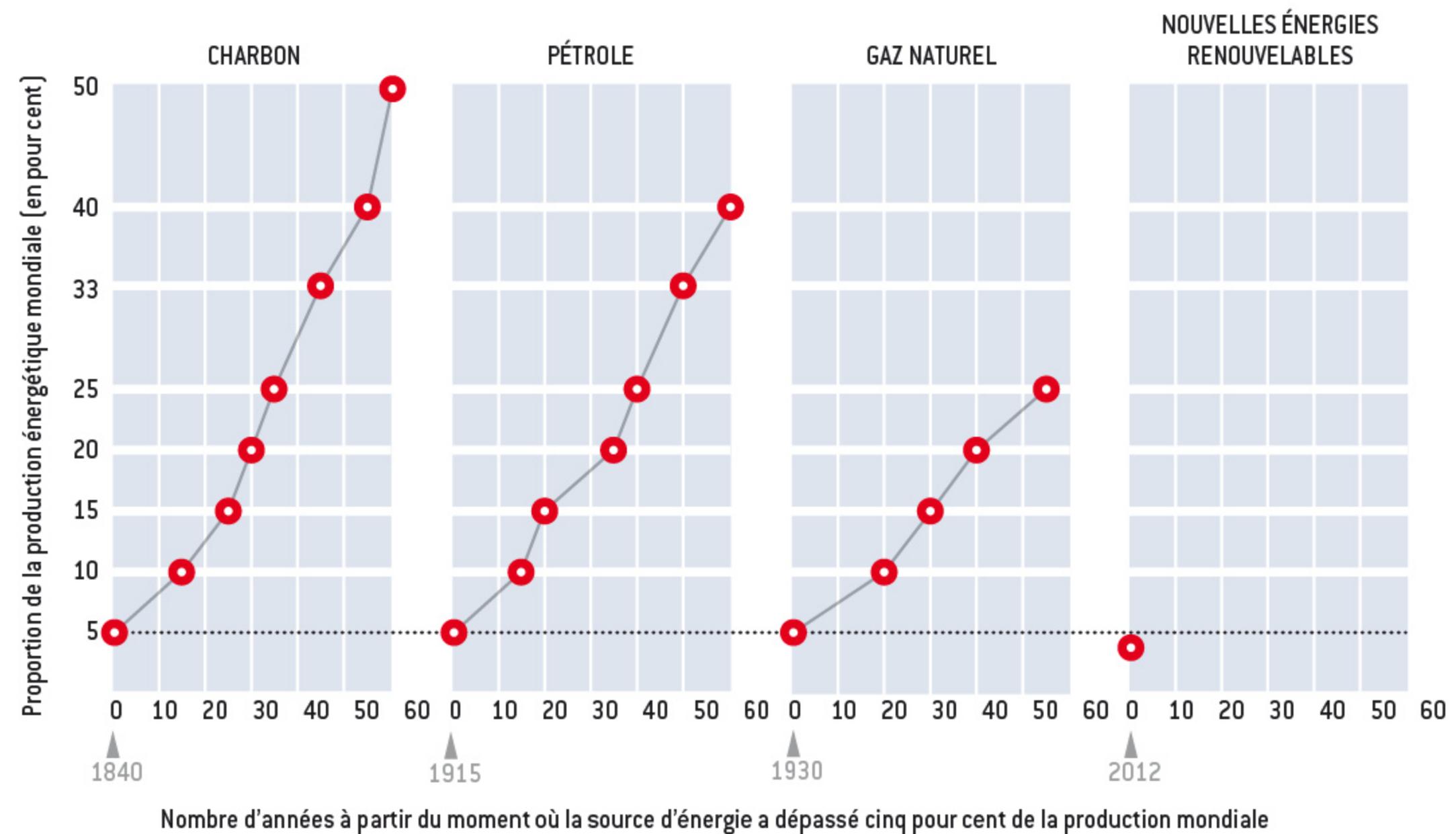
Jusqu'ici, les énergies renouvelables suivent la même évolution lente. En 2011, elles ont fourni 9,4 pour cent de l'énergie consommée par les États-Unis, qui était d'environ 103×10^{18} joules. Les énergies renouvelables classiques ont représenté six pour cent, répartis entre les centrales hydroélectriques (3,25 pour cent), le bois (2 pour cent, essentiellement des déchets issus d'opérations de débitage), et, pour une part modeste, la biomasse et la géothermie.

Les « nouvelles » énergies renouvelables n'ont fourni que 3,35 pour cent du total, avec des parts respectives de 2, 1,19 et 0,16 pour cent pour les biocarburants liquides, l'éolien et le solaire. Dans les pays industrialisés, ces trois dernières sources devront assurer la quasi-totalité de la croissance des énergies renouvelables, car le potentiel des autres, en particulier

DES TRANSITIONS QUI DEMANDENT DES DÉCENNIES

Chaque source d'énergie qui a dominé l'approvisionnement mondial a mis 50 à 60 ans pour parvenir à son point culminant. Le charbon a atteint cinq pour cent de l'approvisionnement mondial en 1840 (*en bas à gauche*) et a progressivement pris le pas sur le bois : environ 60 ans plus tard, vers 1900, il représentait la moitié de la consommation énergétique. Lors des transitions suivantes, les parts du pétrole et du gaz naturel ont augmenté de façon voisine après avoir

passé la barre des cinq pour cent. Le pétrole n'a pas encore atteint 50 pour cent et n'y parviendra peut-être jamais. La part du gaz naturel évolue encore et augmente plus lentement. Les sources modernes d'énergie renouvelable – l'éolien, le solaire et les biocarburants liquides – ne représentent qu'environ 3,4 pour cent du total. À moins d'une rupture technologique ou politique, la transition vers ces énergies devrait, elle aussi, être longue.



l'énergie hydroélectrique, est déjà presque entièrement exploité.

La transition vers des énergies renouvelables pose plusieurs difficultés. La première est la quantité considérable d'énergie à produire. En 2012, les énergies fossiles ont fourni environ 450 exajoules (450×10^{18} joules) dans le monde. C'est 20 fois plus que durant les années 1890, quand le charbon a pris le pas sur le bois. Assurer la production d'autant d'énergie avec de nouvelles sources reste un défi.

L'obstacle de l'intermittence...

Une autre difficulté est la nature intermittente des énergies solaire et éolienne. Nos sociétés modernes ont besoin d'un approvisionnement fiable et ininterrompu en électricité et font face à une demande nocturne croissante. Aux États-Unis, le charbon et les centrales nucléaires assurent la « charge de base », c'est-à-dire la part de l'électricité produite en continu tout au long de la journée ; en France, cette charge est surtout assurée par le nucléaire. Les centrales hydroélectriques et les centrales au gaz, susceptibles d'être démarrées ou éteintes rapidement, réagissent aux périodes de pointe : elles fournissent le supplément d'énergie nécessaire pour satisfaire les pics de demande, brefs mais intenses, à certains moments de la journée.

L'éolien et le solaire peuvent contribuer à la charge de base, mais sans l'assurer de façon continue. En effet, le vent ne souffle pas en permanence, le Soleil ne brille pas la nuit et l'apport énergétique de ces deux sources est difficile à prévoir. Dans certains pays bien avancés sur la voie du renouvelable, telle l'Allemagne, l'éolien et le solaire fournissent une quantité d'énergie très variable. Parfois négligeable, cette quantité atteint la moitié de la demande à certains moments ensoleillés et venteux. Ces fluctuations importantes nécessitent soit un recours à d'autres centrales électriques, qui brûlent en général du charbon ou du gaz, soit une augmentation des importations d'électricité. Dans le cas de l'Allemagne, cela peut perturber l'alimentation électrique de certains pays voisins.

Les nouvelles énergies renouvelables se développeraient bien plus vite s'il existait un moyen peu coûteux de stocker l'énergie. On pourrait alors mettre en réserve les énormes surplus produits par l'éolien et le solaire quand la demande est faible,

afin de les utiliser pour satisfaire les pics de demande. Malheureusement, malgré plusieurs décennies de recherche, on ne dispose que d'une seule technique applicable à grande échelle : quand l'énergie est en excès, on l'utilise pour pomper de l'eau jusqu'à un réservoir situé en altitude, puis, quand elle manque, on déverse l'eau à travers une turbine pour produire de l'électricité. Peu d'endroits présentent la variation d'altitude nécessaire à ce dispositif, qui entraîne en outre des pertes d'énergie.

Une autre solution consiste à construire un réseau de centrales éoliennes et solaires assez vaste pour couvrir une région de la taille d'une grande nation ou de la moitié d'un continent, et à les relier par des lignes électriques. Ainsi, on optimiserait les chances pour qu'au moins une partie des centrales soit toujours en mesure de fournir de l'énergie au réseau. Des lignes d'une qualité et d'une longueur suffisantes sont techniquement réalisables, mais elles coûtent cher et suscitent souvent une forte opposition locale : aux États-Unis comme en Allemagne, la pose de nouvelles lignes est approuvée à un rythme très lent.

...et celui des infrastructures

Enfin, l'adoption en masse des énergies renouvelables devrait nécessiter une réorganisation fondamentale des infrastructures énergétiques. Pour l'électricité, on passerait d'un assez petit nombre de grandes centrales thermiques ou hydroélectriques à une multitude de petits systèmes éoliens et solaires, répartis sur le territoire. Les carburants liquides ne seraient plus produits par extraction du sous-sol d'un pétrole à forte densité énergétique, mais par la culture de végétaux et la fabrication de biocarburants, à densité énergétique plus faible. Pour bien des raisons, la transition vers les énergies renouvelables est plus contraignante que le passage du charbon au pétrole, puis du pétrole au gaz naturel.

Le dernier facteur qui allongera la durée de la transition est la préexistence d'infrastructures importantes et coûteuses, adaptées au système énergétique actuel : mines de charbon, puits de pétrole, gazoducs, raffineries, stations-service par millions... Même si nous disposions d'une énergie renouvelable presque gratuite, il serait économiquement impensable pour les États, les grandes entre-

■ L'AUTEUR



Vaclav SMIL est professeur émérite à l'Université du Manitoba, au Canada. Il est l'auteur de plus d'une trentaine d'ouvrages portant sur l'énergie et l'environnement.

■ SUR LE WEB

Bilan énergétique mondial en 2012 : www.bp.com/content/dam/bp/pdf/statistical-review/statistical_review_of_world_energy_2013.pdf

■ BIBLIOGRAPHIE

R. Mosseri et C. Jeandel (éds.), *L'énergie à découvert*, CNRS Éditions, 2013.

V. Smil, *Energy Transitions: History, Requirements, Prospects*, Praeger, 2010.

Énergies à volonté !, Dossier Pour la Science n° 69, octobre-décembre 2010.

M. Jacobson et M. Delucchi, *Énergies renouvelables : comment couvrir les besoins mondiaux en 2030*, Pour la Science, n° 386, décembre 2009.

prises ou les municipalités d'abandonner les énormes investissements consentis pour ces installations, d'une valeur estimée à au moins 20 000 milliards de dollars à l'échelle mondiale. Selon mes calculs, entre 2001 et 2010, la Chine a dépensé 500 milliards de dollars (365 milliards d'euros) pour construire des centrales au charbon, d'une capacité totale de 300 gigawatts – supérieure à ce que peuvent produire à partir d'énergies fossiles l'Allemagne, la France, le Royaume-Uni, l'Italie et l'Espagne réunis. Ces centrales sont prévues pour fonctionner au moins 30 ans. Aucun pays ne peut renoncer à de tels investissements.

La transition reste souhaitable

Soyons clairs. Outre les émissions de gaz à effet de serre, de nombreuses raisons environnementales poussent à réduire la dépendance vis-à-vis des combustibles fossiles. La combustion de ces derniers émet des oxydes de soufre et d'azote, qui entraînent des pluies acides et un brouillard photochimique (formé par la transformation de polluants sous l'effet de la lumière). Elle dégage aussi de la suie, qui accroît le réchauffement climatique, et des métaux lourds, dangereux pour la santé. En outre, l'exploitation des combustibles fossiles pollue les eaux et abîme les sols. Le basculement vers des énergies non fossiles est donc souhaitable, bien que certaines des solutions énergétiques alternatives aient aussi un impact notable sur l'environnement.

Savoir que cette transition prendra plusieurs décennies influe sur les choix à faire. Jusqu'ici, les politiques énergétiques et environnementales n'ont pas été à la hauteur. Au lieu de lubies à court terme et d'engagements pris à la légère, nous avons besoin de politiques à long terme, fondées sur des attentes现实的.

Pour y parvenir, nous devons éviter d'être trop sélectifs dans les recherches. Les gouvernements ne peuvent pas prévoir quelles technologies seront injectées sur le marché, et ils ne devraient donc pas se concentrer uniquement sur certaines pistes telles que les réacteurs nucléaires à neutrons rapides ou les véhicules électriques fonctionnant avec une pile à combustible à l'hydrogène. La meilleure stratégie est d'investir dans une grande variété d'activités de recherche. Qui aurait deviné dans les années 1980 que, durant les trois

Un élément inédit : le facteur climatique

La lenteur des transitions énergétiques n'est pas surprenante, notamment en raison de la lourdeur des infrastructures. Une centrale nucléaire est construite en dix ans et fonctionne pendant une quarantaine d'années ; la constante de temps caractéristique est donc d'un demi-siècle.

Cependant, un nouveau facteur entre en jeu pour la transition énergétique en cours : selon les études scientifiques fiables, nous devons diviser par deux les émissions mondiales de gaz à effet de serre d'ici 2050 pour éviter un changement climatique de trop grande ampleur (2 °C maximum). Il reste donc moins de 35 ans.

Cela peut paraître hors d'atteinte du fait des inerties décrites dans l'analyse historique de V. Smil, mais le facteur climatique implique que la transition ne soit plus gouvernée par les seuls facteurs écono-

miques et technologiques : des politiques volontaristes peuvent jouer un rôle. De nombreuses études visent donc à accélérer la transition. Dans certaines d'entre elles, on élaborer différents scénarios globaux de réduction des émissions et on en modélise l'impact sur le climat à l'échelle mondiale. Ainsi, l'étude AMPERE, financée par la Commission européenne, indique que le réchauffement peut être limité à 2°C à condition d'agir dès maintenant et vigoureusement, en combinant des actions de réduction de la demande (gains

d'efficacité énergétique, isolation des bâtiments, etc.) et de décarbonisation de l'offre (passage aux énergies renouvelables ou nucléaire, séquestration du carbone). Si l'on attend 2030, il sera trop tard.

D'autres études, tel le projet *Deep Decarbonisation Pathways*, commandité par l'ONU, partent plutôt d'une échelle nationale, afin d'évaluer les réductions possibles en fonction des caractéristiques et des priorités politiques de chaque pays. En combinant ces deux approches, on cherche à identifier quelles politiques publiques permettraient de réduire l'écart entre ce qui est souhaitable et ce qui est réalisable. L'avenir du climat en dépend.

– Patrick Criqui
directeur du laboratoire EDDEN, CNRS

décennies suivantes, le meilleur retour sur investissement aux États-Unis concerne-rait non pas les réacteurs nucléaires ou les cellules photovoltaïques, mais le forage horizontal et la fracturation hydraulique pour l'exploitation des gaz de schiste ?

Les subventions peuvent accélérer la transition, mais elles doivent être guidées par des évaluations réalistes des technologies et des entreprises. On éviterait ainsi de répéter le cas de Solyndra, un fabricant de systèmes photovoltaïques qui a reçu 535 millions de dollars (environ 380 millions d'euros) du gouvernement américain, avant de faire faillite.

En outre, les prix de l'énergie devraient refléter les coûts réels, incluant ceux associés aux impacts sur l'environnement et sur la santé, immédiats et à long terme. Ces impacts sont variés : gaz à effet de serre et suie pour les combustibles fossiles, érosion des sols et manque d'eau provoqué par la consommation des céréales pour le bioéthanol, etc. Les prix doivent aussi intégrer les investissements nécessaires, tels ceux associés à la construction d'un super-réseau à haute tension pour relier

des fermes éoliennes et solaires éloignées les unes des autres. Les habitants et les responsables politiques des pays industrialisés doivent comprendre que le prix de l'énergie, bien qu'en augmentation, a été particulièrtement bas durant les 50 dernières années. Ces populations devraient payer plus pour prendre en compte les conséquences environnementales et sanitaires de l'énergie.

La façon la plus efficace d'accélérer la transition et l'abandon des sources fossiles est de réduire la consommation énergétique mondiale. Plus la demande augmente vite, plus il est difficile d'en satisfaire une part importante avec les énergies renouvelables. Des études récentes ont montré qu'aucun problème technique insurmontable n'empêche de réduire d'un tiers la consommation d'énergie, à la fois dans les pays émergents et dans les pays riches, notamment grâce à des gains en efficacité.

Qu'elles soient nationales ou mondiales, les transitions énergétiques prennent du temps. Le virage qui se dessine actuellement, des combustibles fossiles vers les énergies renouvelables, ne fera pas exception. Il nécessitera des générations de persévérance. ■