

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.

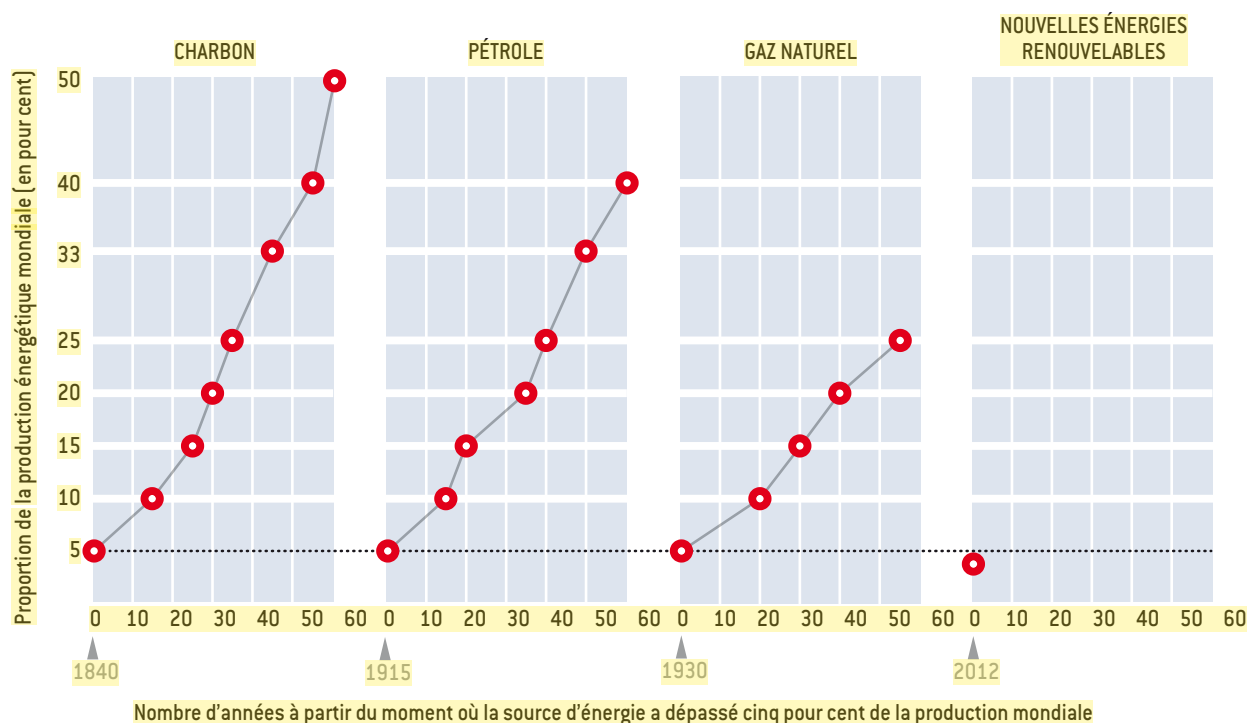
Jusqu'ici, les énergies renouvelables suivent la même évolution lente. En 2011, elles ont fourni 9,4 pour cent de l'énergie consommée par les États-Unis, qui était d'environ 103×10^{18} joules. Les énergies renouvelables classiques ont représenté six pour cent, répartis entre les centrales hydroélectriques (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.