



Vers un monde postcarbone ?

Comment réduire rapidement les émissions de gaz à effet de serre dues aux énergies fossiles, tout en satisfaisant les énormes besoins mondiaux en énergie et en prenant en compte la grande inertie de nos systèmes énergétiques ? Un tour d'horizon des enjeux énergétiques décisifs pour les décennies à venir.

Vaclav Smil

est professeur émérite à la faculté d'environnement de l'université du Manitoba au Canada. Spécialiste mondial des énergies, son approche transdisciplinaire englobe de nombreux domaines : l'eau, l'agriculture, l'alimentation, l'environnement, l'histoire des techniques. Il a travaillé comme consultant pour de nombreuses institutions européennes, américaines et internationales. En 2010, il figure dans la liste des « 100 penseurs mondiaux » du magazine *Foreign Policy*.

« Nous devrions utiliser les sources inépuisables d'énergie que fournit la Nature : le soleil, le vent et les marées... J'investirais mon argent dans le soleil et l'énergie solaire. Quelle source d'énergie ! J'espère que nous n'attendrons pas d'être à court de charbon et de pétrole pour nous y intéresser. »

Thomas Edison en 1931, cité dans : James Newton, *Uncommon Friends : Life with Thomas Edison, Henry Ford, Harvey Firestone, Alexis Carrel & Charles Lindbergh*, Harcourt, 1987, p. 31.

En 2060, l'ère des énergies fossiles sera-t-elle derrière nous ?

Toute prévision énergétique de long terme est un exercice voué à l'échec, car forcément trop statique par rapport aux dynamiques complexes des systèmes énergétiques dans le temps. Mais ce que l'histoire nous enseigne, c'est que les grandes transitions énergétiques s'étendent sur plusieurs décennies et non, comme pour les microprocesseurs, sur quelques années : il n'y a pas de loi de Moore pour les systèmes énergétiques. Plus d'un siècle s'est ainsi écoulé entre les débuts de la production de pétrole dans les années 1860, et son apogée dans les années 1970. Et plus une source d'énergie est déployée à grande échelle, plus il faut du temps pour opérer la substitution. Or, aujourd'hui, 85 % de la production totale d'énergie primaire (Ptep) provient des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz). De même, la mondialisation sans précédent des échanges économiques contemporains serait impossible sans les moteurs Diesel et les turbines à gaz – deux forces motrices inventées dans les années 1890 pour la première, 1930 pour la seconde – qui seront encore très probablement parmi nous en 2060.

Il faut également souligner l'extraordinaire ampleur de la transition à venir. Du fait de l'augmentation exponentielle de la population et de la consommation énergétique mondiale depuis cent cinquante ans, elle représente un effort vingt fois plus important que la précédente transition de la biomasse (bois, charbon de bois et résidus de culture) vers les combustibles fossiles ayant débuté vers 1850. Ceci est un immense défi pour un monde dont les besoins énergétiques futurs sont énormes : si moins d'un sixième de l'humanité bénéficie aujourd'hui d'un haut niveau de consommation énergétique, un gros tiers (dont la Chine) est actuellement engagé dans une course effrénée pour rejoindre cette minorité, et plus de la moitié de la population mondiale n'a pas encore entamé cette ascension.

Enfin, toute société est modelée par les énergies qu'elle consomme. La nôtre est une civilisation des énergies fossiles : nos grandes villes, notre économie globalisée, nos niveaux de richesse sans précédent, nos flux de transports intenses, nos communications instantanées, nos excédents de nourriture... Tout ceci n'aurait pas pu voir le jour sans les hautes densités énergétiques qu'offrent les combustibles fossiles et sans la grande transportabilité des produits pétroliers raffinés. En retour, les énormes investissements, réalisés sur un siècle pour l'ensemble des infrastructures liées aux énergies fossiles, créent une très grande inertie de notre organisation socio-économique. Remplacer la totalité de ces infrastructures dans le monde prendra nécessairement plusieurs décennies.

Ne serons-nous pas bientôt confrontés, de toute façon, à une pénurie de ressources fossiles ?

Les ressources fossiles disponibles, y compris les sources non conventionnelles comme les schistes bitumineux, semblent suffisantes pour alimenter en théorie toute la première moitié du XXI^e siècle. Elles n'en restent pas moins en quantité finie, et elles sont non renouvelables à notre échelle de temps. Le déclin de notre dépendance au charbon et aux hydrocarbures est donc inévitable. Cependant le *rythme* de ce déclin dépendra non seulement de l'offre (l'épuisement physique des ressources), mais aussi de la *demande* future d'énergies fossiles. Or, celle-ci est déterminée par un jeu complexe de substitutions énergétiques, d'avancées techniques, de coûts d'extraction, de politiques publiques, et de plus en plus par des considérations environnementales locales et surtout globales : la menace du changement climatique impose de réduire drastiquement les émissions de gaz à effet de serre générées par leur combustion.

L'énergie de l'an 2000 vue en 1960 : pétrole ou solaire ?

« Sans doute en l'an 2000 que vous verrez, d'autres sources d'énergie auront-elles été trouvées ; la part de l'énergie atomique sera devenue importante. Le pétrole continuera toutefois de régner longtemps encore. Vos grands-parents ont connu l'ère du pétrole lampant, vos parents et vous-même l'ère de l'essence, vous connaîtrez sans doute l'âge du dérivé. Vous aurez ainsi vécu l'essentiel de votre vie sous le signe du pétrole. »

Extrait de : Pierre Lacroix, *Fabuleux pétrole*, Édicope, coll. « L'homme et son aventure », 1960.

« Sur des millions de toits, des capteurs en verre absorbaient la chaleur du soleil pour la stocker dans des réservoirs. Ils formaient de véritables usines de chauffage domestique sans apport d'autre carburant. Le monde de 1999 commençait à exploiter la plus grande source d'énergie, les rayons quotidiens du soleil, et grâce à ce trésor doré, on éclairait les villes, on faisait fleurir les déserts, on traquait les vaches et on faisait cuire les gâteaux. »

Extrait de : Victor Cohn, 1999 :
Our Hopeful Future, Bobbs-Merrill, 1956.

100 % d'énergies renouvelables en 2050 ?

Délibérément volontaristes, plusieurs études récentes (WWF, Jacobson et Delucchi) estiment possible de parvenir à un monde alimenté à presque 100 % par les énergies renouvelables d'ici 2050, en tirant parti uniquement de technologies déjà disponibles et éprouvées. Pour le WWF, cela est « possible techniquement et économiquement », et « ne requiert pas de changements radicaux dans nos modes de vie ». Le scénario de l'organisation environnementale combine réduction de 15 % de la consommation énergétique globale en 2050 par rapport à 2005, et substitution à 95 % des énergies fossiles par les énergies renouvelables d'ici 2050. À noter cependant qu'il s'agit de la consommation finale, et non de l'énergie primaire.

De son côté, pour son *Rapport spécial sur les sources d'énergies renouvelables* (2011), le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Giec) a passé en revue 164 scénarios de déploiement mondial des énergies renouvelables d'ici 2050. Il en ressort que plus de la moitié des scénarios prévoient une contribution des énergies renouvelables supérieure à 27 % de l'énergie primaire en 2050, allant jusqu'à 77 % pour les plus optimistes. Dans tous les cas, « les politiques publiques jouent un rôle crucial pour accélérer le déploiement des énergies renouvelables ».

Quel pourrait être le rôle des énergies renouvelables dans cette transition ?

C'est une question complexe, car si elles sont la promesse d'un monde décarboné, les énergies renouvelables présentent aussi des inconvénients majeurs. Leur abondance n'est pas en cause : le total des rayonnements solaires reçus par la Terre (directement ou après leur conversion naturelle en biomasse, vent, hydroénergie...) dépasse largement toute demande énergétique future imaginable.

Le problème est qu'il s'agit d'énergies peu denses, très diffuses et inégalement disponibles dans le temps et dans l'espace.

La transition vers les énergies fossiles au XIX^e siècle avait entraîné une forte hausse des densités énergétiques. Avec la transition vers un monde postcarbone, nous faisons face au défi inverse : remplacer des énergies fossiles à forte densité énergétique par des énergies renouvelables bien moins denses. De plus, leur caractère très diffus induit de faibles densités de puissance⁽¹⁾ – trop faibles pour fournir les hauts débits que requièrent nos systèmes industriels et urbains. Cet écart signifie qu'un système basé sur l'énergie solaire augmentera fortement les surfaces foncières requises pour la production énergétique, et conduira à de profondes restructurations spatiales aux lourdes conséquences environnementales et socio-économiques.

Le caractère intermittent et peu prévisible des énergies renouvelables est un autre facteur limitant. Nos sociétés modernes dépendent de flux massifs et incessants d'énergie, qui fluctuent selon les heures, les jours et les saisons. Les combustibles fossiles, facilement stockables, ainsi que les centrales thermiques, permettent de répondre à ces besoins. En revanche, nous ne sommes pas encore capables de stocker à grande échelle l'électricité générée par le solaire ou l'éolien. Enfin, au moins autant que le pétrole ou le gaz, les énergies renouvelables sont inégalement réparties ; des régions densément peuplées n'ont pas de sources locales d'énergies renouvelables, tandis que de nombreux sites ensoleillés ou venteux sont loin des grands centres urbains. Leur exploitation nécessiterait donc la construction de méga-infrastructures entièrement neuves et très coûteuses.

Ne peut-on pas espérer que les innovations technologiques apporteront une réponse à ces problèmes ?

Probablement, mais cela prendra du temps ! À terme, on devrait notamment parvenir à convertir l'énergie solaire directe beaucoup

plus efficacement et meilleur marché, voire à créer des organismes au potentiel photosynthétique décuplé. La recherche dans ces domaines devrait recevoir la plus haute priorité. Mais d'ici là, plusieurs décennies s'écouleront avant qu'on puisse se passer des énergies fossiles grâce aux énergies renouvelables. Actuellement, aucune autre technique de conversion énergétique en cours de développement ne peut prétendre concurrencer les éner-

gies fossiles à grande échelle. C'est le cas de l'hydrogène : il n'y a pas de perspective pour produire à bon marché ce vecteur de haute densité énergétique avant plusieurs décennies. Une économie dominée par l'hydrogène, nécessitant la production de grandes quantités de ce

gaz sans énergies fossiles, ne devrait donc pas voir le jour avant la fin du XXI^e siècle.

De son côté, le nucléaire est une source d'énergie très efficace, mais dont la généralisation à grande échelle se heurterait à deux problèmes. Premièrement, le monde serait vite confronté à une pénurie d'uranium 235 bon marché. Seule la commercialisation de surgénérateurs, qui créent plus de matière fissile qu'ils n'en consomment, permettrait de surmonter cette pénurie. Mais des problèmes techniques ont conduit à l'arrêt de tous les prototypes, et aucun projet commercialement viable n'est actuellement prêt. Le second problème est qu'aucun pays n'a encore réussi à boucler le cycle du nucléaire : nous ne disposons pas de méthode fiable pour traiter les déchets hautement radioactifs. Tant que nous n'aurons pas réglé ces deux problèmes, il est peu probable que la fission devienne un contributeur sensiblement plus important à la production énergétique mondiale. Et les énormes défis techniques que pose la fusion nucléaire rendent cette solution extrêmement improbable à l'horizon 2050, et sans doute au-delà.

S'agissant des techniques de captage et de séquestration de CO₂, toute évaluation un peu sérieuse conduit à les mettre fortement en question. Bien entendu, cela ne concerne pas la séquestration végétale de CO₂ par la reforestation et l'enrichissement du sol en matière organique. Mais au-delà, l'accent doit être mis sur la réduction des gaz à effet de serre, et non sur leur enfouissement souterrain selon des méthodes peu fiables et très coûteuses.

(1) La densité de puissance est le taux de production énergétique par unité de surface terrestre, souvent exprimé en W/m².

Enfin, il faut bien sûr innover davantage pour améliorer l'efficacité énergétique de nos produits et processus de production. Mais il faut aussi prendre en compte l'effet rebond : des solutions moins énergivores deviennent moins chères, ce qui stimule la demande future totale, soit dans la même catégorie (rebond direct), soit pour d'autres biens et services (effet indirect). Sans une réduction parallèle de la consommation d'énergie, les gains d'efficacité énergétique deviennent donc une partie du problème plutôt qu'une solution.

Mener à bien la transition postcarbone passerait donc aussi par une réduction de notre consommation énergétique ?

Je pense en effet que nous devrions y réfléchir sérieusement, ainsi qu'à un partage plus équitable de l'énergie au niveau mondial. La consommation énergétique annuelle par personne varie considérablement selon les pays : de moins de 10 gigajoules (GJ) au Niger, à plus de 330 GJ aux États-Unis, avec une moyenne mondiale d'environ 70 GJ⁽²⁾. Il est évident que des pays comme l'Éthiopie ou l'Inde ont besoin de services énergétiques accrus. En revanche, les pays occidentaux pourraient réduire progressivement leur consommation énergétique par personne, qui est extraordinairement élevée, tout en continuant à bénéficier d'une haute qualité de vie. Il serait parfaitement possible de viser le niveau énergétique qui prévalait il y a une ou deux générations. Vivait-on de manière si épouvantable il y a trente ans que retrouver ces niveaux de consommation ne puisse être envisagé par aucun responsable politique sérieux, parce qu'il sent – de manière correcte, je le crains – que le public considérerait ces propositions comme inacceptables ? Le défi énergétique est donc aussi politique : quelle société voulons-nous et quelles adaptations pouvons-nous imaginer pour y parvenir ? La recherche de la maximisation des flux énergétiques, qui a caractérisé la civilisation des énergies fossiles, n'est pas une tendance inévitable de l'évolution. Les économies ne sont que des sous-systèmes de la biosphère. Nous avons

les moyens techniques et économiques pour mettre en œuvre des réductions rationnelles, étendues sur plusieurs générations, de la consommation énergétique des pays riches (et des quelques centaines de millions de riches urbains dans les pays pauvres), tout en assurant une bonne qualité de vie pour une part croissante de l'humanité, et en garantissant l'intégrité de la biosphère.

Les modalités de ce changement de cap ne peuvent pas être déterminées *a priori* par un grandiose plan intergouvernemental. Elles émergeront d'un processus long, complexe, foisonnant, dont les progrès seront ponctués de mauvais choix et de culs-de-sac. Cela génère forcément des craintes – mais également de l'espoir. Les transitions énergétiques présentent d'immenses défis à la fois pour les producteurs et les consommateurs et nécessitent l'abandon ou la réorganisation de vastes infrastructures.

Elles sont longues et coûteuses et causent des bouleversements socio-économiques importants. Mais elles stimulent les avancées technologiques et l'inventivité humaine. Nous pouvons compter pour cela

sur notre connaissance accrue de la biosphère, sur notre ingéniosité technique et nos capacités d'adaptation sociale.

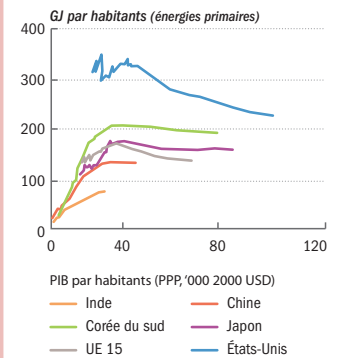
En même temps, nous devons éviter les grands projets fondés sur une foi déplacée en une technique particulière, qui serait LA solution à ces défis énergétiques complexes. Les prétentions faites sur la base de techniques expérimentales survivent rarement à l'épreuve de leur généralisation à grande échelle dans le monde réel. Nous avons besoin d'approches réalisables et acceptables d'un point de vue économique et environnemental. Et par-dessus tout, nos efforts devraient être consacrés à la réduction de la demande finale plutôt qu'à l'accroissement de l'offre énergétique.

Propos recueillis et traduits de l'anglais par Martin Hervouët

(2) La consommation énergétique annuelle d'un Français était de 186 GJ en 2008 (données EIA; Insee).

La sobriété énergétique, une idée qui fait son chemin ?

Une première ? Dans son scénario « Blueprints », la société pétrolière Shell envisage une baisse graduelle de la consommation énergétique des habitants en Europe et aux États-Unis d'ici 2050, conjuguée à une croissance continue du PIB.



Source : scénarios énergétiques Shell à l'horizon 2050, Shell International BV, 2008. Chaque courbe débute en 1970 et s'achève en 2050. Les États-Unis passeraient ainsi d'environ 320 GJ et 30 000 \$ par habitant en 1970 à environ 250 GJ et 100 000 \$ en 2050.

Références bibliographiques

- IAU idF, « Contraintes énergétiques et mutations urbaines », *Les Cahiers*, n° 147, février 2008.
- Dessus Benjamin et David Sylvain, *Peut-on sauver notre planète sans toucher à notre mode de vie ?*, coll. « Pour ou contre ? », Éd. Prométhée, 2010.
- GIEC, *Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, 2011.
- JACOBSON Z. Mark, DELUCCHI A. Mark, « Providing all global energy with wind, water, and solar power », *Energy Policy*, 2010.
- Revue *Futuribles*, « Quelles énergies pour demain ? », n° 376, juillet-août 2011.
- SMIL Vaclav, *Energy in Nature and Society*, The MIT Press, Cambridge, 2008.
- WINGERT Jean-Luc et LAHERERRE Jean (préf.), *La Vie après le pétrole. De la pénurie aux énergies nouvelles*, Éd. Autrement, 2005.
- WWF, *The Energy Report. 100 % Renewable Energy By 2050*, février 2011.