



PAR JEAN BOSCHAT (86)

42 ans (ENSTA, MBA HEC), vice-président chez AT Kearney en charge des Practices Transport et Private Equity



ET PHILIPPE BIHOUIX

36 ans, centralien, directeur chez AT Kearney, en charge de l'initiative développement durable pour le bureau de Paris

L'énergie mondiale face à la pénurie ou Colbert et les leçons du « peak wood »

Aux limites des réserves fossiles, sans alternative d'envergure suffisante, la production mondiale d'énergie finira par entrer en décroissance. À moins d'une très hypothétique révolution technologique, il nous faudra faire face à une pénurie sans précédent, qui inversera les tendances actuelles avec la réduction des transports, la relocalisation de l'économie, la réapparition du réutilisable et du réparabile, et la fin de la culture de l'obsolescence programmée.

■ Depuis le démarrage de l'exploitation industrielle du charbon au XVIII^e siècle ou le premier puits de pétrole de Pennsylvanie en 1859, toutes les productions d'énergie fossile sont en croissance. Le choc pétrolier des années soixante-dix n'a pas réduit, même temporairement, la consommation de pétrole. Le nucléaire et l'hydroélectrique n'ont fait qu'absorber une partie de la croissance de la demande. Le charbon reste la deuxième source mondiale d'énergie, et n'est pas réservé aux pays en développement : la production électrique et les industries du monde développé en dépendent largement. À ce jour, la production mondiale d'énergies renouvelables, hors hydroélectrique, reste négligeable (moins de 1 %).

Une demande en forte croissance

Les prévisions de croissance de la demande sont très fortes pour plusieurs raisons : les 12 milliards de

tep de consommation annuelle mondiale (soit 1,8 tep par terrien) sont très inégalement répartis (8 tep aux États-Unis, 4 tep en Europe, 1,3 tep en Chine et 0,5 tep en Inde). Aligner la population mondiale sur la moyenne européenne de 4 tep conduirait à tripler la demande mondiale. La consommation d'énergie progresse de manière corrélée avec la croissance du PIB et chaque dollar de PIB supplémentaire augmente de 100 à 400 grammes d'équivalent pétrole la demande mondiale. De même, la mondialisation dope la croissance des échanges et accroît d'autant le besoin en pétrole. Si le besoin en marchandises transportées par personne reste remarquablement stable dans les pays développés (autour de 70 kg par jour et par personne), le nombre de kilomètres à parcourir progresse fortement. L'arbitrage entre coût du travail et coût de l'énergie a été jusqu'à présent favorable aux délocalisations.

La consommation annuelle mondiale d'énergie primaire avoisine les 12 milliards de tep (tonnes équivalent pétrole). Elle a été multipliée par 5 depuis la Seconde Guerre mondiale, sous le double effet de l'augmentation de la population (multipliée par 2 dans les quarante dernières années) et de la consommation par personne (multipliée par 7 en moins d'un siècle).

Les différents scénarios de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) tablent ainsi sur une demande annuelle de 15 à 17 milliards de tep à l'horizon 2030, et environ 20 milliards de tep à l'horizon 2050.

Aux limites des réserves fossiles

La notion de réserve pour les énergies fossiles est un subtil mélange d'éléments techniques et économiques mais aussi affaire d'appréciation. Les réserves prouvées sont celles « dont l'existence est physiquement prouvée, et productibles de manière raisonnablement certaine, au niveau de technologie actuel, au prix actuel ». Les réserves probables et possibles font appel à une dose d'appréciation encore supérieure.

Comment augmenter les réserves ? Prenons l'exemple du pétrole.

Découvrir de nouveaux champs

Il reste de nouvelles réserves à découvrir (les géologues s'accordent souvent sur environ 150 milliards de tep). Mais l'*offshore* trouvera bientôt ses limites, puisque au-delà de 3 000 m d'eau on quitte le plateau continental et ses dépôts sédimentaires. Et depuis la fin des années quatre-vingt, on découvre moins de pétrole qu'on n'en consomme (1 baril découvert pour 4 consommés actuellement). La production repose largement sur une soixantaine de champs « super-géants » (plus de 700 millions de tep), qui représentent 40 % des réserves. 70 % à 80 % de la production d'Arabie Saoudite, d'Irak et du Koweït reposent sur 8 champs découverts avant 1970.

Mieux récupérer

Le taux de récupération est actuellement d'environ 35 %. Puits déviés, injection d'eau ou de gaz, etc., devraient permettre de continuer à gagner quelques points dans le futur, soit quelques dizaines de milliards

Récupérer plus qu'on investit

Il y a une limite physique à l'augmentation mécanique des réserves : il faut dans tous les cas récupérer plus d'énergie qu'on en investit dans les opérations d'extraction. La production *offshore* consomme 10 à 15 % de son énergie produite (15 barils consommés pour 100 produits). On monte à 25 %, voire 50 % (investis sous forme de gaz) dans le cas des sables asphaltiques de l'Alberta (Canada) : il faut consommer l'équivalent d'un baril pour en extraire deux ! Cette contrainte incontournable ne permettra pas d'exploiter plus de 15 % (donc moins de 100 milliards de tep) de ces pétroles non conventionnels. Sans compter les contraintes de mise en production. Seuls 7 à 9 millions de barils par jour seraient produits en 2030 par cette voie (6 à 8 % de la demande).

Les ressources ultimes

La notion de « ressources ultimes » permet de s'affranchir des quelques incertitudes liées au calcul des réserves prouvées, probables ou possibles. Il y aurait environ 4 200 milliards de tep (Gtep) de réserves ultimes, dont 3 000 Gtep de charbon, 600 Gtep de pétrole/gaz conventionnels et 600 Gtep de pétrole/gaz non conventionnels. Largement de quoi emballer le climat, malheureusement, puisque la consommation de ces ressources ultimes monterait la concentration en CO₂ à plus de 2 000 ppm (parties par million), soit 4 fois le niveau maximal préconisé par le GIEC.

Au taux de croissance actuel, soit 2 %, l'intégralité de ces ressources ultimes serait consommée avant un siècle. On peut éloigner cette échéance en réduisant le taux de croissance [c'est ce qu'on fait pour se rassurer en parlant de réserves « en années de consommation » comme si celle-ci était stable alors qu'elle n'a fait que croître par le passé]. On peut aussi la rapprocher en prenant en compte la limite extractible au lieu des réserves ultimes (2 300 à 2 500 Gtep au lieu de 4 200).

de tep. Les propriétés physiques des roches-mères et des hydrocarbures ne permettent pas d'envisager beaucoup plus.

Aligner la consommation moyenne mondiale sur l'Europe conduirait à tripler la demande

Augmenter les prix

Les réserves sont ce qui est « productible au prix actuel », donc toute élévation du prix augmente mécaniquement les réserves. On peut aller chercher du pétrole et du gaz plus loin à un coût plus élevé (*offshore* profond, huiles lourdes, sables asphaltiques, schistes bitumineux).

Revoir les évaluations

On peut aussi augmenter « virtuellement » les réserves, en révisant le niveau d'appréciation : c'est difficile pour les compagnies pétrolières cotées et assez surveillées, mais plus simple pour certains pays producteurs. Plusieurs pays majeurs de l'OPEP ont ainsi fait un bond dans leurs réserves prouvées (sans nouvelles découvertes) suite à la mise en place des quotas calculés sur les réserves en 1985.

Produire du pétrole de synthèse

N'attendons pas trop des procédés « Coal to Liquid » et « Gas to Liquid » : pour produire ce carburant de synthèse, 50 % du contenu éner-

gétique d'origine est perdu, et il s'agit toujours de réserves fossiles... En pratique, le phénomène du « peak oil » intervient. Schématiquement, une fois la moitié des réserves sorties de terre, la production va passer par un maximum puis décliner (plus ou moins vite, ce qui permet d'appeler le pic « plafond » ou « plateau »). Le pic est déjà là pour le pétrole (hier selon l'Energy Watch Group, 2010 selon l'ASPO, avant 2020 selon Total) : 33 des 48 pays producteurs y sont déjà passés. Il interviendra dans quelques années pour le gaz, à peine quelques décennies pour le charbon, selon l'usage que nous en ferons.

Vivre sans énergies fossiles ?

Confronté à cette augmentation de la demande et aux réserves limitées d'énergie fossile, le réflexe naturel est de rechercher des sources d'énergie alternatives. Commençons par le plus complexe, mais qui a souvent la faveur des médias quand il s'agit des alternatives dans les transports : l'hydrogène.

L'hydrogène

Séduisant sur le papier comme moyen de stockage de l'énergie, notamment pour les sources intermittentes comme l'éolien et le solaire, son rendement laisse cependant à désirer, sans compter les problèmes de déploiement d'un réseau de distribution et de stockage.

➤ À titre d'ordre de grandeur, la production de 2 milliards de tep sous forme d'hydrogène (soit environ 600 millions de tonnes) pour couvrir 80 % des besoins mondiaux actuels de mobilité nécessiterait 30 000 TWh de production électrique, soit une multiplication par 10 du parc nucléaire existant. En France, il nous « suffirait » d'ajouter 48 GW (34 EPR) pour nos 25 millions de tep utilisés dans les transports ! Difficile politiquement et industriellement. L'hydrogène restera donc marginal.

Voyons maintenant les autres alternatives aux énergies fossiles : renouvelables et nucléaire. Nous avons construit un scénario théorique, très extrémiste, pour voir si nous pourrions « vivre sans les énergies fossiles » avec nos habitudes actuelles.

Sur quoi est-il construit ?

L'hydroélectrique

Environ 700 millions de tep (Mtep) sont produits actuellement (pour les spécialistes, nous avons pris un facteur de conversion des 3 000 TWh semblable au thermique et au nucléaire). Cette production pourrait encore presque doubler (au prix de quelques arbitrages environnementaux douloureux).

Le solaire photovoltaïque

En multipliant la production actuelle par 200 (9 fois les prévisions de l'AIE à 2030, plusieurs centaines d'années de production au rythme actuel de fabrication des panneaux pour fournir les 20 milliards de mètres carrés de panneaux), on atteint 450 Mtep. Difficile malheureusement d'en faire autre chose qu'un appoint (sauf le solaire thermique en application décentralisée).

L'éolien

Nous pouvons produire 2,3 milliards de tep (Gtep) en multipliant la production par 60, soit 7 fois les prévisions de l'AIE à 2030.

La géothermie

Les ressources sont très localisées mais non négligeables. Nous retenir 5 fois les prévisions de l'AIE à 2030 comme hypothèse de travail, soit 230 Mtep.

Les biocarburants

En y dédiant 10 % des terres arables (au prix d'arbitrages difficiles avec les besoins agricoles alimentaires) on atteindrait 140 Mtep à raison d'une tep par hectare (en y dédiant l'intégralité des terres arables, on produirait moins de 40 % du pétrole consommé actuellement).

Au taux de croissance actuel l'intégralité des « ressources ultimes » serait consommée avant un siècle

La biomasse

La mise en coupe réglée d'un quart des forêts mondiales à usage énergétique uniquement (arbitrages douloureux en perspective avec les zones protégées, le bois d'œuvre et la pâte à papier) rapporterait environ 3 Gtep.

Tous ces efforts gigantesques, tant en déploiement industriel (a-t-on réellement les ressources en hommes et en métaux pour cela ?) qu'en arbitrages environnementaux et sociétaux délicats, nous permettraient d'atteindre « seulement » 7,5 Gtep, soit deux tiers de la consommation actuelle.

Le nucléaire

Compte tenu de ce qui précède, en prenant 20 Gtep comme consommation future (hypothèse « réaliste » de 8 milliards d'habitants à « seulement » 2,5 tep/an), il nous faudrait, pour compléter notre production renouvelable avec du nucléaire, produire autour de 80 000 TWh (en y dédiant la moitié à la production d'hydrogène pour les usages de transport), donc multiplier le parc

actuel par 25 !

Et les autres technologies ? Là encore, on se heurte à l'ordre de grandeur ou à la maturité technologique.

Les vagues

Outre le fait que les régions du monde intéressantes sont assez limitées, elle restera marginale. Un système comme Pelamis, déployé sur 1 000 km de côtes, produirait... moins de 4 % de la production électrique française.

Les courants marins

Les hydroliennes présentent l'intérêt d'être des sources moins intermittentes que les éoliennes... mais le bilan des opérations (maintenance sous-marine, etc.) reste à démontrer et le potentiel est limité.

La fusion

La fusion ne présente strictement aucun intérêt par rapport à la fission génération IV. Elle produit aussi des déchets, et tant que le tritium est

Les limites du nucléaire

Multiplier le parc nucléaire par 25 est difficilement imaginable, pour au moins deux raisons :

- il faudrait impérativement passer à la génération IV (les surgénérateurs utilisant l'uranium 238 ou le thorium comme combustible), car les réserves d'uranium 235 sont de l'ordre du siècle au rythme actuel, et toute croissance du parc réduira les réserves (le prix de l'uranium augmente d'ailleurs actuellement dans le sillage du pétrole). Celle-ci ne devrait pas être prête au déploiement industriel avant 2040 ;
- la capacité industrielle est limitée : il faudra déjà renouveler le parc vieillissant de la génération II dans les décennies qui viennent, avant de songer à l'augmentation de capacité ; 50 % d'augmentation de capacité à l'horizon 2040 semble déjà très ambitieux, donc 2 500 % à l'échelle d'un siècle, par exemple, paraît irréaliste.

produit à partir du lithium, elle n'offre pas une source illimitée, mais comparable à la surgénération (soit quelques milliers d'années).

Les nouveaux biocarburants

Les biocarburants de génération 2 (déchets verts) et 3 (algues) offrent l'intérêt de ne pas être en compétition avec la production alimentaire. Mais on se heurte encore à des limites physiques : production primaire nette (génération 2) ou compétition dans l'usage des surfaces (les algues doivent recevoir les rayons du soleil pour croître).

Une décroissance inexorable

Lâchons le mot : à moyen terme, la production mondiale d'énergie va donc entrer en décroissance. La consommation mondiale devra s'y adapter. Nous ne parlons pas nécessairement de choc pétrolier ou énergétique. Mais dans un mécanisme de marché, le prix va inexorablement monter pour ajuster la demande à l'offre contrainte. Nous aurons également des problèmes liés à la pénurie pour les applications non énergétiques des ressources fossiles (matériaux, lubrifiants, engrais...).

À partir de ce constat simple, nous pouvons dresser quelques conséquences probables pour les entreprises, et d'abord les changements de paradigme que vivront sans doute les générations actuelles ou futures.

Relocaliser

Le renchérissement de l'énergie aidant, les arbitrages local-global finiront par s'inverser. Après la vague des délocalisations, nous devrions assister à une relocalisation de l'économie, à une « réindustrialisation », les échanges dépendant fortement du pétrole.

Stocker et moins transporter

Une reconfiguration complète de la chaîne logistique s'imposera dans

de nombreux secteurs : le juste à temps est très consommateur d'énergie (c'est du stock sur la route ou dans les airs) et l'arbitrage devrait redevenir favorable à des schémas de stockage plus pertinents pour des modes de transport moins énergivores, mais plus contraignants (bateau, train).

Le prix de l'énergie va inexorablement monter pour ajuster la demande à l'offre contrainte

Réparer et réutiliser

La réapparition du réutilisable et du réparable se fera au détriment du jetable : retour des consignes pour les boissons, modularité dans la conception des objets, etc. Le jetable est très (trop) consommateur d'énergie et de matières premières pour tenir face à une tension énergétique.

Faire durer et conserver

On devrait voir la fin de la culture de l'obsolescence programmée, qui nous fait consommer toujours plus et remplacer nos produits de consommation courante (produits bruns, téléphonie, informatique, etc.) à un rythme jamais atteint auparavant.

Ceux qui se prépareront à temps à ces changements, en termes d'innovation produits et services, de réflexion sur la conception, la fabrication, la distribution et la fin de vie de leurs produits, de positionnement marketing, de gestion du risque, seront les gagnants de cette mutation énergétique mondiale. Bien entendu tous les secteurs ne seront pas logés à la même enseigne, entre la capacité plus ou moins grande à sortir de « l'oléodépendance » et la perception, par des clients tendus sous ambiance inflationniste, de l'utilité réelle des biens et services rendus. Mais c'est d'abord la capacité à regarder la

Colbert et le « peak wood » du XVII^e siècle

Un seul moment dans l'histoire de l'humanité est comparable à ce qui s'annonce. À partir du milieu du XVII^e siècle se profile une crise énergétique grave en Europe occidentale, notamment en Angleterre et en France. La source d'énergie principale est le bois, la déforestation pour l'agriculture et la surexploitation le rendent de plus en plus rare et cher. Les forêts du Nouveau Monde sont à portée de main, mais construire des bateaux en bois pour aller chercher du bois n'est pas physiquement rentable (il faudrait mettre plus d'une unité pour récupérer une unité... comme pour une partie du pétrole non conventionnel !). Le « peak wood » est là !

L'Europe s'en sortira grâce à la mise en place de réglementations fortes (restrictions étatiques, plans de gestion) et une double révolution technologique. En France, Colbert établit en 1669 l'ordonnance relative à la création et à l'entretien des bois et forêts. Il replante massivement pour préparer l'avenir (en tant qu'ancien ministre de la Marine, il sait qu'il faut 3 000 chênes centenaires pour construire un bateau de guerre). Nous lui devons une bonne partie de nos forêts.

La double révolution technologique viendra d'Angleterre. Vers 1700-1710, Thomas Savery invente la pompe à vapeur, Thomas Newcomen la machine à vapeur. La combinaison des deux permettra l'exploitation des mines de charbon souterraines, en pompant les nappes phréatiques. La révolution industrielle pouvait démarrer.

réalité en face et l'anticipation qui feront les gagnants et les perdants de demain.

Faut-il continuer sur notre lancée en attendant un improbable successeur de Colbert et une hypothétique révolution technologique ? Il paraît plus réaliste d'intégrer d'ores et déjà dans nos comportements, mais aussi dans l'évolution de l'économie et des entreprises, la nécessaire baisse de la consommation d'énergie et les conséquences pour les entreprises aussi bien en termes d'offre et de modèle économique qu'en termes de choix opérationnels. ■