

futuribles

# *futuribles*

*L'anticipation au service de l'action*

Les prévisions énergétiques

Science, science-fiction  
et innovation

Hommage à Thomas More

JANVIER-FÉVRIER 2017 - NUMÉRO 416

# Les prévisions énergétiques et leurs aléas

PAR RODOLPHE GREGGIO ET BENOÎT MAFFÉI <sup>1</sup>

*Comme le souligne Jean-Marie Chevalier dans ce même numéro, il est bien délicat de se prononcer aujourd'hui sur ce que sera l'évolution des prix de l'énergie et d'envisager la façon dont se transformeront les systèmes de production énergétique. C'est bien ce que confirment ici Rodolphe Greggio et Benoît Mafféï, qui se sont intéressés à la façon dont sont élaborées les prévisions énergétiques à long terme et dont la conclusion est qu'en l'état, elles sont vouées à l'échec.*

*Ceci résulte en particulier de la difficulté à faire des prévisions fiables en termes d'évolution de la demande d'énergie, celle-ci résultant d'évolutions exogènes et opaques à long terme (croissance démographique, croissance économique, productivité, efficacité énergétique...). Cela tient également à un certain nombre d'erreurs d'anticipation de ruptures technologiques : un « âge d'or » du gaz naturel anticipé trop tôt, la valse du pic pétrolier, un pic minéralier n'ayant pas eu les incidences envisagées initialement, un déclin du nucléaire à relativiser, etc. Cela résulte enfin de divers facteurs d'ordre politique et géopolitique en lien avec les atouts respectifs des pays en matière énergétique et leur stratégie d'indépendance en ce domaine : États-Unis et gaz de schiste, France et nucléaire, Allemagne et renouvelables, par exemple. Bien évidemment, le contexte actuel laisse à penser que l'heure est à une transition progressive des énergies carbonées vers les énergies renouvelables, mais de là à prévoir précisément à quel horizon, dans quelles proportions et selon quelle ampleur géographique, il y a un pas qui paraît encore difficile à franchir. S.D. ■*

1. Les deux auteurs viennent de publier *Après la COP21. Géopolitiques de la transition énergétique* (Paris : Technip, 2016). Certains thèmes évoqués dans cet article y font l'objet de développements approfondis.

**L**a conjoncture actuelle dans l'énergie illustre une nouvelle fois les difficultés auxquelles les entreprises du secteur se heurtent : si le contrechoc pétrolier de 2014 semble les avoir frappées par un effet de surprise, c'est en réalité toute l'histoire de cette branche de l'économie qui montre à quel point les opérateurs commettent de manière récurrente des erreurs, qui les amènent à réaliser des investissements qui s'avèreront par la suite inexploitable dans des conditions optimales, ou bien déclassés.

Certes, les erreurs en matière de planification stratégique concernent l'ensemble du champ économique et elles ne font que traduire le caractère fondamentalement incertain de toute décision d'investissement. Mais leur impact est particulièrement dévastateur dans un secteur — l'énergie — caractérisé à la fois par une très forte intensité capitalistique et par une considérable inertie, et où les évolutions des *mix* énergétiques s'inscrivent sur le long, voire le très long terme. Certains investissements requièrent en effet plusieurs décennies pour être amortis et, parfois, ne le sont qu'à des horizons encore plus lointains, comme le montre le cas des très grandes infrastructures énergétiques qui sont, en conséquence, financées et / ou réalisées en partie ou en totalité par le secteur public (ou à la rigueur sur ressources propres).

Les grands acteurs du secteur énergétique rencontrent toujours des difficultés à élaborer des prévisions fiables en termes de demande <sup>2</sup>, en raison du caractère exogène de certaines évolutions macroéconomiques, des transformations technologiques non anticipées, ainsi que des interférences des logiques politiques dans la mise en œuvre des stratégies dans ce domaine.

## ***Des paramètres macroéconomiques exogènes et opaques sur le long terme***

La modélisation de la demande future d'énergie présuppose de définir les états prévisionnels de l'économie mondiale. Ceux-ci dépendent, en priorité, des taux de croissance de la population, de la production et de la productivité, qui ne peuvent tous être anticipés de la même façon, sans omettre l'évolution de l'intensité énergétique de la croissance économique.

## ***Essor démographique, croissance économique et évolution de la productivité***

Les prévisions démographiques sont marquées par une remarquable inertie pour les deux à trois décennies suivantes, ce qui leur permet de fournir des indications décisives sur l'augmentation de la demande d'énergie sur

---

2. Cet article se focalise sur les évolutions en volume. Une impuissance encore plus radicale caractérise les tentatives de prévision en termes de prix des différentes sources d'énergie sur des horizons plus ou moins lointains.

un horizon de long terme : les zones à forte croissance de population étant l'Afrique subsaharienne et l'Asie du Sud, elles devraient concentrer la plus grande partie d'une telle progression. *A contrario*, le potentiel de croissance économique à long terme est soumis à un degré d'incertitude bien supérieur, comme l'illustrent les cas des deux espaces régionaux précités, dont la poursuite du décollage constitue sans doute un des déterminants centraux du niveau futur de la demande mondiale d'énergie (voir encadré ci-dessous).

Mais les analyses économétriques soulignent que la croissance du produit intérieur brut (PIB) à long terme est déterminée tout d'abord par sa composante de productivité. Il est manifeste que la phase de mondialisation intensive de l'économie (2001-2008) n'a été rendue possible que parce que les nouvelles technologies de l'information et de la communication ont permis l'optimisation des chaînes productives et logistiques, et leur extension à certains espaces asiatiques émergents (en partie par la délocalisation des unités industrielles auparavant situées dans les pays de l'OCDE, l'Organisation de coopération et de développement économiques). Pourtant, à l'heure actuelle, comme l'illustrent les débats autour de la « stagnation séculaire », il est impossible de savoir si la révolution du numérique générera de véritables gains de productivité, ou bien si elle sera de nature principalement qualitative, améliorant les services déjà existants, mais sans augmenter de manière radicale la quantité de biens et services produits.

### LE RÔLE MAJEUR DE L'ASIE ET L'AFRIQUE DANS LA DEMANDE FUTURE D'ÉNERGIE

En Asie, le modèle chinois de développement est entré en crise et l'Inde ne peut relayer son puissant voisin en tant qu'« atelier du monde », malgré un coût de la main-d'œuvre très inférieur, faute de ressources énergétiques et foncières suffisantes. De surcroît, si la transition énergétique peut constituer un relais de croissance pour la Chine, c'est probablement moins le cas pour l'Inde qui, après avoir développé précocement les énergies renouvelables, a pris désormais conscience de leurs limites, ainsi que de leurs coûts, incompatibles pour le moment avec le pouvoir d'achat moyen des populations du sous-continent.

Les perspectives économiques de l'Afrique subsaharienne sont tout aussi incertaines, cette partie du monde n'ayant pas véritablement tiré parti de la mondialisation, notamment indus-

trielle, tandis que depuis 1994, le produit intérieur brut par habitant continue d'osciller entre un quart et un cinquième de la moyenne mondiale. Tout véritable développement du continent, et donc toute augmentation substantielle de la consommation d'énergie (en particulier la forte amélioration de l'accès à l'électricité, à défaut d'une croissance importante des taux de motorisation), ne peut reposer que sur un processus d'industrialisation. Or aucun mouvement significatif de délocalisation des unités de production depuis l'Asie n'y est pour l'heure observé (bien au contraire, certains pays sont plutôt en voie de désindustrialisation), tandis que la solvabilité de la demande finale constitue toujours le principal obstacle à l'électrification, notamment en zone rurale.

R.G. et B.M.

## Efficienc e énergétique et bouclage des modèles

Pareilles incertitudes en matière de prévision macroéconomique ne sauraient en aucun cas remettre en question la très forte croissance des besoins mondiaux en énergie qui se profile à l'horizon du XXI<sup>e</sup> siècle. Une autre variable, plus spécifique au domaine énergétique, acquiert dès lors une importance tout à fait décisive : le rythme des progrès envisageables dans l'efficacité énergétique, autrement dit les liens entre la croissance économique et l'évolution de la consommation d'énergie. Jusqu'au deuxième choc pétrolier (1979-1982), une très forte corrélation entre ces deux variables a été constatée, ce qui signifie qu'il n'existait quasiment aucun progrès significatif en matière de performance énergétique. À partir du début des années 1980, en revanche, la diffusion des dispositifs électroniques au sein des systèmes productifs et logistiques a permis d'accroître sensiblement l'efficacité de ces derniers. En conséquence, les pays qui ont amorcé leur processus de développement à partir des décennies 1980-90 (principalement les « dragons » asiatiques et quelques nations émergentes de la génération suivante) ont bénéficié de systèmes énergétiques de plus en plus optimisés tout au long de leur trajectoire de rattrapage.

**Tableau 1 — Évolution de l'efficacité énergétique de la croissance mondiale (taux de croissance annuel moyen, en %, 1971-2015)**

	1971-1975	1976-1980	1981-1985	1986-1990	1991-1995	1996-2000	2001-2005	2006-2010	2011-2015	1971-2015
PIB (OCDE)	3,4	3,6	2,8	3,7	3,3	3,8	3,8	3,8	3,4	3,5
Demande d'énergie primaire (BP)	3,2	3,0	1,6	2,5	1,1	1,8	3,1	2,2	1,5	2,2
Écart	0,2	0,7	1,2	1,1	2,2	2,0	0,7	1,6	1,8	1,3

Source : calculs des auteurs, à partir de données OCDE et BP (British Petroleum). La tertiarisation de l'économie mondiale se traduit bien par un écart plus marqué entre la croissance du PIB et celle de la consommation d'énergie. L'exception de la période 2001-2005 correspond à la phase d'accumulation intensive du capital industriel de la Chine.

Il est vrai, cependant, que la mesure de l'efficacité énergétique globale demeure plutôt indéterminée : s'il est aisé d'opposer la performance japonaise dans ce domaine à la médiocrité du bilan chinois, il ne faut pas oublier que, outre le fait que la forte croissance économique du pays a permis de maintenir en activité jusqu'à présent de nombreux sites productifs peu efficaces, Pékin a accueilli sur son territoire de nombreuses unités très énergivores dont les pays postindustriels se sont débarrassés à bon compte (comme la production de panneaux solaires, mais aussi une grande partie des industries de première transformation des matières premières). La délocalisation des unités industrielles dans les pays émergents fausse complètement l'appréhension de l'efficacité énergétique des économies nationales, et les pays postindustriels donnent l'illusion de mieux maîtriser leur consommation d'énergie uniquement parce que les activités de service sont bien moins énergivores (et génératrices de nuisances) que le secteur secondaire.

En tout état de cause, il s'avère néanmoins que les scénarios en matière de demande énergétique ne peuvent boucler leurs projections qu'en misant, précisément, sur l'augmentation de l'efficacité énergétique, variable d'ajustement par excellence. Pour les prévisionnistes, il n'est donc possible de faire face à la hausse attendue des besoins dans les prochaines décennies qu'en envisageant une baisse substantielle et continue de la quantité d'énergie consommée pour produire une unité supplémentaire de PIB. C'est pourquoi les taux d'augmentation de l'efficacité énergétique publiés par les différents organismes de prévision — Agence internationale de l'énergie (AIE), Energy Information Administration (EIA), multinationales de l'énergie — sont très élevés : ils s'étendent de 1,5 % à 2 % en valeur annuelle. Et ce, en rupture par rapport aux tendances observées dans le passé <sup>3</sup> : entre 1970 et 2015, le taux de croissance annuel moyen de l'économie mondiale ayant été de 3,5 % et celui de la demande d'énergie primaire de 2,2 %, le taux moyen de croissance de l'efficacité énergétique n'a pas dépassé 1,3 %. Au cas où de pareilles performances ne seraient pas enregistrées <sup>4</sup>, la pénurie d'énergie constituerait une entrave majeure à la poursuite du développement économique.

La prise en compte de valeurs aussi remarquables pour ce dernier paramètre requiert d'être interprétée. Trois hypothèses peuvent être formulées : anticipations rationnellement fondées au vu des avancées technologiques actuelles ; message à caractère politique (une incitation à l'accroissement des dépenses de recherche-développement dans ce domaine) s'appuyant sur un mécanisme de prophétie autoréalisatrice ; pure instrumentalisation d'une variable rendue nécessaire pour égaliser la demande et l'offre d'énergie aux horizons temporels visés par la modélisation, auquel cas l'augmentation de l'efficacité énergétique relèverait d'une pure logique de pari <sup>5</sup>. Au vu des progrès technologiques actuellement constatés, la première hypothèse ne serait cependant pas à exclure.

3. Cette optimisation des usages de l'énergie concerne l'ensemble des secteurs : isolation des bâtiments et installation de dispositifs rendant possible leur régulation thermique, amélioration de la distribution de l'électricité via les *smart grids*, les compteurs « intelligents » et les objets connectés, et donc *in fine* convergence entre les technologies de l'énergie et celles liées à la communication et l'information. Une des innovations de rupture les plus décisives consisterait à doter les logements de vitrages convertissant directement le rayonnement solaire en chaleur.

4. L'optimisme de telles perspectives est démontré par l'exemple de l'industrie automobile. Les tests ont été aménagés afin que les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) des véhicules soient conformes aux normes européennes, de sorte que, dans des conditions normales d'utilisation, les consommations de carburant sont bien supérieures aux performances officielles. L'amélioration des performances énergétiques des modèles les plus récents est donc en partie fictive, mais il est impossible de subvertir les lois fondamentales de la physique.

5. La croissance démographique aurait pu aussi, en théorie, servir de variable d'ajustement aux fins de bouclage de l'équation, mais l'absence — à l'échelle mondiale — de toute politique de maîtrise de la population en fait un paramètre en grande partie exogène. Il est vrai que les prévisions en matière de population mondiale à très long terme sont assez dispersées, même si les données démographiques publiées par les Nations unies semblent plutôt minorées.

## **Les erreurs d'anticipation des ruptures technologiques**

Au-delà des variables macroéconomiques, c'est à une échelle plus méso ou microéconomique que la prévision énergétique rencontre une autre série d'obstacles : la diffusion de représentations dominantes abusives, en particulier dans le domaine des ruptures ou des basculements technologiques, qui se sont avérées *a posteriori* en partie ou en totalité fictives, et qui ont pu dans certains cas conduire à une allocation sous-optimale des ressources. La décennie qui vient de s'écouler en fournit quelques exemples majeurs.

### **L'anticipation prématurée de l'âge d'or du gaz naturel**

La première grande méprise, source de surinvestissements massifs, a porté sur l'avenir du gaz. Il a souvent été annoncé que les premières décennies du troisième millénaire seraient l'« âge d'or » du gaz naturel (mais non du biogaz, produit par la fermentation des débris végétaux), d'autant que ses émissions en CO<sub>2</sub> sont bien inférieures à celles des autres hydrocarbures. De fait, les investissements dans cette filière ont été colossaux, en raison de la guerre pour les parts de marché que se livrent la Russie (gisements supergésants de Sibérie occidentale) et les exportateurs pro-Occidentaux (Qatar, Australie, Norvège, Canada, Nigeria, voire Oman), tandis que le déclin de certains autres exportateurs (Algérie, Turkménistan, Indonésie, Malaisie) n'implique pas toujours que leurs gisements sont en cours d'épuisement<sup>6</sup> : le potentiel considérable du Turkménistan reste ainsi largement sous-exploité pour des raisons politiques et géographiques.

Mais, en réalité, l'essor de l'industrie gazière a été déterminé par deux événements qui n'avaient pas été prévus par les multinationales : le choc d'offre positif issu de l'exploitation du gaz naturel contenu dans les roches mères (gaz de schiste) aux États-Unis ; et le choc de demande positif découlant de l'accident nucléaire de Fukushima, qui a conduit le Japon à arrêter ses centrales nucléaires et à importer des quantités considérables de GNL (gaz naturel liquéfié). C'est une telle configuration qui a permis une rentabilisation accélérée des très importants investissements réalisés à Ras Laffan au Qatar, les débouchés envisagés au départ aux États-Unis étant opportunément remplacés par la demande japonaise (même si les multinationales ont dû déclasser les usines de regazéification du méthane liquéfié qu'elles avaient construites sur la côte atlantique du continent nord-américain). L'équilibre sur le marché du gaz s'est donc réalisé de façon imprévue, les effets des deux événements — l'un décidé en fonction de la politique d'indépendance énergétique menée avec une grande constance par Washington, l'autre accidentel — se compensant partiellement. Si la catastrophe de Fukushima

---

6. Les appels d'offres internationaux lancés par la Sonatrach ont permis de renouveler les réserves gazières, mais non pétrolières, de l'Algérie : l'épuisement de sa rente pétrolière d'ici quelques décennies constitue le risque géopolitique majeur encouru par l'Afrique du Nord.

n'était pas survenue, une fraction encore plus importante des installations gazières du Qatar serait inemployée à l'heure actuelle.

C'est pourquoi le repli de la demande de l'Archipel (avec le retour prévisible et progressif de l'exploitation des réacteurs nucléaires) et une augmentation supplémentaire de l'offre américaine (même si l'exportation de gaz à partir des États-Unis demeure encore symbolique) pourraient recréer des conditions propices à un effondrement ultérieur des prix et mettre pleinement en lumière la situation de surinvestissement de la branche. Les investissements considérables prévus au nord des côtes australiennes dans cette filière sont dès à présent révisés à la baisse, tandis que la valorisation des gisements d'Iran et du Turkménistan est reportée à un futur plus ou moins lointain <sup>7</sup>.

### *L'éternel retour de la notion de pic pétrolier*

La seconde représentation dominante qui a pu contribuer à opacifier les perspectives énergétiques mondiales repose sur un oubli étrange, celui des mécanismes expliquant la formation des cours du pétrole <sup>8</sup>. Les prix de l'or noir suivent des cycles de court et moyen termes qui ne préjugent en rien du niveau qu'ils atteindront lorsque l'épuisement des ressources se profilera effectivement et qu'il sera nécessaire d'exploiter, peut-être, les gisements les plus onéreux pour faire face à la demande (schistes bitumineux <sup>9</sup>), ce qui pourrait provoquer une crise économique mondiale d'une ampleur jamais connue. C'est pourquoi il est apparu *a posteriori* que leur forte hausse au cours du troisième choc pétrolier (2004-2014), réactualisant les scénarios de pic pétrolier et de déclin imminent du pétrole dans le *mix* mondial, ne correspondait pas à une quelconque raréfaction imminente de la ressource.

De fait, la réalisation d'importants programmes d'investissement dans les zones où les coûts de revient sont les plus bas (monarchies pétrolières, mais aussi Irak dont la production en 2015 a excédé celle de l'Iran) a permis de renouveler la capacité d'extraction des exportateurs faisant office de producteurs d'appoint, une capacité qui de surcroît pourrait révéler d'importantes

7. Des avancées technologiques récentes ont permis cependant de diminuer significativement le coût des carburants de synthèse élaborés à partir du gaz naturel : il s'agit peut-être de la véritable innovation permettant de faire advenir l'âge d'or du gaz naturel.

8. Une théorie générale de la formation des cours du pétrole est exposée dans notre essai *Le Pétrole. Le troisième choc et la malédiction pétrolière*, Paris : Economica, 2014.

9. Les États-Unis posséderaient le plus vaste gisement de schistes bitumineux au monde dans le secteur de la Green River (Utah, Colorado, Wyoming), peut-être avec la Chine (Mongolie) et quelques autres pays (Allemagne, Australie, Estonie, Israël, Jordanie, Madagascar, Maroc, Royaume-Uni, Suède, Syrie, et surtout Brésil et Russie). Le Department of Energy a évoqué un potentiel de 750 milliards de barils avec une densité au moins égale à 25 gallons par tonne traitée. Différentes technologies sont en cours de développement pour rendre leur extraction moins énergivore et plus compatible avec le respect de l'environnement. Le total des ressources mondiales en hydrocarbures contenus dans les schistes bitumineux pourrait atteindre 1 000, voire 1 500 milliards de barils dans le monde, dont une majorité (entre la moitié et les trois quarts) serait localisée dans cette zone du *Rocky Mountain Energy Corridor*.

marges de progression, qu'il s'agisse de gisements susceptibles d'entrer en exploitation dans des délais assez brefs (Kazakhstan <sup>10</sup>) ou à moyen terme (Iran et Venezuela). Dit autrement, c'est bien l'effort d'investissement, et non l'absence de ressource, qui a représenté jusqu'à présent la véritable frontière productive dans le pétrole. Et il est vrai que si les multinationales ont éprouvé, depuis une décennie, de grandes difficultés à renouveler leurs réserves pétrolières (mais non gazières) et qu'elles sont incitées à se tourner vers des champs de plus en plus ardues à exploiter (pétroles non conventionnels, à très grande profondeur sous l'eau, voire en zone arctique), c'est tout d'abord parce qu'elles ne sont pas autorisées à profiter des ressources localisées dans les pays possédant les plus importants gisements (Arabie Saoudite, Iran, Venezuela, voire Russie et Asie centrale) et parce que certains États n'ont pas été en mesure de développer leur production pétrolière (Iran, Libye, Venezuela).

### *Un pic minéralier n'affectant pas en priorité les terres rares*

Le troisième cas de croyance dominante erronée porte sur la disponibilité de « terres rares <sup>11</sup> », dont les énergies renouvelables sont de très importantes consommatrices et qui pourraient effectivement devenir un frein à l'essor de ces dernières. Il est vrai que, dans l'état actuel des techniques, la stratégie énergétique allemande (le développement quasiment exclusif de l'éolien et du solaire) n'est pas plus généralisable à l'ensemble du monde que le choix de la France (le pari sur le nucléaire, confronté à la finitude des réserves d'uranium), sauf à exploiter les ressources minérales sous-marines, une option pour le moment exclue car très onéreuse. Une telle dépendance aux métaux se retrouve dans la filière de l'hydrogène.

Mais la faible disponibilité des terres rares est, en fait, fort relative et la domination de la Chine résulte d'une volonté, ou du moins d'une certaine passivité bienveillante, de la part des États-Unis, désireux de préserver leurs propres gisements. Par ailleurs, les pays postindustriels ont intérêt à localiser les activités polluantes (mines) et énergivores (production de panneaux solaires) sur le territoire chinois. En réalité, le véritable goulet d'étranglement pour le développement des énergies renouvelables, et donc pour la généra-

---

10. Le renoncement, jusqu'à présent, à exploiter le gisement supergéant de Kachagan, sur le rivage kazakh de la mer Caspienne, s'explique par des raisons autant politiques qu'économiques, et non à cause de difficultés techniques (qui ont néanmoins été mises en avant). Ce gisement sera donc exploité dès que les conditions de marché rendront sa mise en production possible, autrement dit que les cours seront durablement réorientés à la hausse, et dès que les multinationales voudront rentabiliser un investissement aussi important.

11. On appelle « terres rares » un groupe de 17 minéraux (métaux) aux propriétés voisines (dont par exemple le scandium, le cérium, le thulium...) dans lesquels se trouvent certaines matières premières essentielles, notamment pour les secteurs de l'électronique et des équipements énergétiques. Leur nom vient du fait qu'elles ont été découvertes au début du XIX<sup>e</sup> siècle, dans des minerais (alors appelés « terres » en français, langue des échanges internationaux) peu courants à cette époque (NDLR).

lisation des usages de l'électricité au monde entier, réside dans la rareté non des terres rares mais de l'ensemble des ressources minérales, et en particulier du cuivre, essentiel pour le transport du courant, du moins tant qu'un matériau aux propriétés de conductivité similaires n'aura pas été mis au point.

### *Un déclin du nucléaire à relativiser*

Enfin, le nouveau millénaire a semblé douter de l'avenir de l'énergie nucléaire. L'accident de Fukushima a conduit certains pays qui avaient envisagé de se doter de réacteurs à abandonner ou à reporter ces investissements, et a conforté la politique de renoncement de certains pays européens (Allemagne, Espagne, Italie, Suède, Suisse), tandis que les États-Unis paraissent sur la voie d'un désengagement définitif. Les difficultés de la filière nucléaire en France soulèvent aussi des interrogations sur le futur d'une telle énergie dans l'Hexagone, d'autant que ce dernier dispose d'un potentiel non négligeable dans certaines énergies renouvelables. De fait, la part du nucléaire dans le *mix* énergétique mondial a continué de reculer. Ce déclin de l'atome civil doit pourtant être remis en perspective, et surtout relativisé en fonction des trajectoires nationales.

En particulier, la crise de l'industrie nucléaire française résulte de la combinaison de quatre facteurs qui lui sont tout à fait spécifiques : les dissensions internes — notamment l'opposition frontale entre Électricité de France (EDF) et Areva pour la maîtrise exclusive de l'ingénierie des centrales, qui a abouti à une reprise en main de la filière par la première — ; une attrition des savoir-faire industriels et les défauts de certains composants métalliques expliquant en partie les retards dans la construction de la nouvelle génération de réacteurs (Finlande, France) ; des investissements miniers très malencontreux (Afrique du Sud, Namibie, République centrafricaine) ; les espoirs infondés sur le marché sud-africain — en parfaite méconnaissance du tropisme géopolitique de l'African National Congress, spontanément orienté vers la Russie, et de sa mainmise croissante sur la filière charbonnière qui ne l'incite guère à développer les sources alternatives de génération d'électricité<sup>12</sup>.

Il serait dès lors erroné d'évaluer l'avenir du nucléaire à l'échelle mondiale à l'aune des difficultés actuelles de la filière française, lesquelles contrastent avec le dynamisme de certains opérateurs étrangers. En remportant le contrat des Émirats arabes unis, la Corée du Sud exporte pour la première

12. L'emprise des dirigeants de l'ANC dans l'économie charbonnière, en vertu de la doctrine du *Black Economic Empowerment*, constitue un des obstacles majeurs à la construction du barrage de Grand Inga, qui permettrait de valoriser une partie du fabuleux potentiel hydroélectrique du fleuve Congo. Il est impossible en effet de rentabiliser un tel investissement sans bénéficier d'un débouché important sur le premier marché africain de l'électricité. L'Afrique du Sud doit nécessairement arbitrer entre ces trois sources de production d'électricité (charbon, hydraulique, nucléaire) pour faire face à la hausse de la demande dans toute la partie méridionale de l'Afrique.

fois des réacteurs nucléaires et se positionne en tant que nouveau fournisseur potentiel pour l'Arabie Saoudite si, du moins, le royaume wahhabite décide de se doter de pareilles infrastructures. De son côté, le russe Rosatom s'est imposé comme le fournisseur de référence de quelques pays émergents (Arménie, Égypte, Hongrie, Iran, Jordanie, Turquie, à l'avenir Viêt-nam et peut-être Bangladesh), tandis que l'Inde vient de conclure un accord de coopération avec le Japon après en avoir signé un avec les États-Unis. Quant au renoncement de certaines capitales à se lancer dans une telle filière, il est parfois dénué de réelle signification, dans la mesure où ces pays étaient loin de disposer de l'expertise requise pour accueillir, sinon pour exploiter, de pareilles unités (ainsi le Venezuela). La politique énergétique du Royaume-Uni, qui se dote de nouvelles centrales nucléaires tout en développant l'éolien *offshore*, pourrait correspondre à l'invention d'un des grands modèles du futur, la fission (ou, un jour peut-être, la fusion nucléaire avec ITER, l'*International Thermonuclear Experimental Reactor*) répondant à la demande électrique de base et les renouvelables couvrant les besoins supplémentaires.

De toute façon, l'avenir du nucléaire en France même paraît bien moins menacé qu'on ne le prétend parfois. L'exploitation du gaz naturel extrait des roches mères aux États-Unis a permis, certes, de diminuer le recours au charbon pour la génération d'électricité, mais elle a également mis un terme aux perspectives de relance du programme électronucléaire dans ce pays — qui exploite actuellement le plus grand nombre de centrales. C'est pourquoi il est possible, *a contrario*, d'interpréter l'interdiction de toute prospection des hydrocarbures de schiste sur le territoire hexagonal, malgré une géologie plutôt prometteuse, en termes de préservation de la filière de l'atome : il n'est pas à exclure que cette décision, par-delà de légitimes considérations environnementales, n'ait été prise afin de prévenir la découverte d'éventuels gisements gaziers qui, s'ils étaient exploités, produiraient une électricité au coût de revient bien moins élevé que celle issue des réacteurs nucléaires (surtout ceux mis en conformité avec les nouvelles normes de sûreté).

***Ces erreurs d'anticipation ont pour principale origine la récurrence des confusions entre les différentes perspectives temporelles, notamment les interférences entre l'horizon de long terme et celui de plus court terme***

L'ensemble de ces erreurs d'anticipation a pour principale origine la récurrence des confusions entre les différentes perspectives temporelles, et notamment les interférences commises par les acteurs entre l'horizon de long terme du cycle de l'investissement dans les infrastructures énergétiques, et celui de plus court terme marqué par les inévitables chocs exogènes de nature économique, technologique ou politique. C'est pourquoi il est irrationnel de vouloir élaborer une véritable stratégie énergétique en se fondant sur les variations — plus ou moins erratiques — des prix des différentes sources d'énergie à très court terme : le processus de la transition énergétique est beaucoup trop complexe et incertain pour qu'il ne tienne compte que de prix qui ne reflètent que des situations d'équilibre tout à fait transitoires.

## ***Volontarisme politique et impératif d'indépendance énergétique***

Les paradigmes technologiques dominants sont forgés, voire instrumentalisés par l'ensemble des acteurs de la filière. Si les multinationales jouent un rôle essentiel, les États exercent toujours un rôle déterminant pour procéder aux arbitrages entre les différentes sources d'énergie, quitte à susciter le développement de nouvelles entreprises afin de contester la prééminence des énergéticiens traditionnels. Mais l'analyse des politiques énergétiques est un exercice fort complexe.

### ***L'implication des pouvoirs publics américains en faveur des hydrocarbures de roche mère***

L'afflux massif de gaz de schiste a provoqué dans un premier temps un effondrement des prix sur le marché intérieur des États-Unis : les bénéfices tirés des ventes du pétrole à des cours très élevés étaient alors censés compenser les pertes sur le gaz. Mais la forte baisse des cours de l'or noir à partir du contrechoc de 2014 aurait dû compromettre la viabilité de ce secteur. Or, contrairement aux attentes, l'activité a fait preuve d'une étonnante résistance et enregistré d'importants gains de productivité. Il est vrai que, Washington ayant pour premier objectif de réduire de manière significative ses importations de matières premières énergétiques, il n'est pas à exclure que l'exploitation des hydrocarbures contenus dans les roches mères ne continue, comme dans le passé, à être subventionnée plus ou moins directement (ou bien qu'elle fasse l'objet d'une certaine bienveillance de la part de ses financeurs).

En réalité, une telle politique a été menée à deux niveaux. Dans un premier temps, des organismes publics ont piloté la plus grande partie des projets de recherche, tandis que les multinationales se désintéressaient d'un domaine jugé technologiquement risqué et financièrement incertain. Dans un second temps, l'aide publique a pris la forme d'une politique de soutien fiscal aux entreprises du secteur, confrontées au recul marqué de leur rentabilité : en effet, la production d'hydrocarbures de schiste aux États-Unis est réalisée en majorité par des opérateurs de taille petite ou moyenne, qui peuvent certes différer l'amortissement de leurs investissements, mais qui, très endettés, sont soumis à une forte contrainte de solvabilité vis-à-vis de leurs bailleurs de fonds (alors que les multinationales ont les moyens d'arbitrer en faveur des activités qu'elles jugent les plus rentables à long terme). C'est pourquoi, même si sa nécessaire restructuration devrait s'effectuer *in fine* sous l'égide de ses créanciers, le recul des cours des hydrocarbures ne devrait pas remettre en cause la survie d'une branche<sup>13</sup> dont le développement est redevable à la

13. La production saoudienne de pétrole a battu un nouveau record en 2015, tout comme celles des États-Unis (une hausse de 90 % depuis le creux de 2008) et de la Russie (une progression de 80 % depuis le point bas de 1998). Depuis le minimum de 1999 (31 %), les trois premiers producteurs de pétrole ont significativement accru leur poids dans la production mondiale (dépassant 38 % en 2015).

puissance technologique du pays et à la vitalité de ses entrepreneurs, y compris dans un domaine dominé par de puissantes multinationales.

## ***La stratégie allemande en faveur des énergies renouvelables***

De son côté, l'Allemagne semble animée par un tropisme environnementaliste fort prononcé, qui l'a conduite à sacrifier son nucléaire et à viser à terme une électricité entièrement renouvelable. Mais dans ce cas aussi, l'indépendance énergétique est au cœur des préoccupations des décideurs publics. La sortie de l'atome civil permet en effet de quitter une filière dont le pays ne maîtrise pas un certain nombre d'étapes clés de la chaîne de valeur (approvisionnement en uranium, enrichissement du minerai et retraitement des combustibles irradiés), et dont le sacrifice était inévitable du moment que l'on souhaitait développer les énergies renouvelables dans le contexte de faible croissance de la demande que connaît le pays. Ce choix permet en outre de continuer à exploiter le lignite national<sup>14</sup>, afin de compenser les inévitables fluctuations des ressources renouvelables, par nature intermittentes, tout en maîtrisant le poids des importations de gaz russe dans la production électrique<sup>15</sup>. Et ce d'autant que la puissance du *lobby* charbonnier, ainsi que, surtout, celle du secteur de la production d'équipements miniers, rendent difficile l'abandon de cette branche d'activité, très présente de surcroît dans les *Länder* orientaux confrontés à une conjoncture économique structurellement atone.

Bien d'autres pays pourraient illustrer l'importance des considérations géopolitiques — l'accroissement de l'indépendance énergétique — dans le soutien public accordé à certaines branches de l'énergie, qu'il s'agisse du tropisme français en faveur du nucléaire, de la prédominance des hydrocarbures en Russie (fort peu intéressée par la transition énergétique) ainsi qu'en Arabie Saoudite, ou bien encore du rôle du charbon en Pologne (de même qu'en Australie, en Colombie, en Indonésie ou en Russie). Sans oublier que la majeure partie des subventions aux énergies carbonées dans le monde est versée par des pays rentiers, émergents et en développement, afin de réduire les prix des produits et services de base consommés par leurs populations.

---

14. La baisse temporaire des cours du charbon, parallèlement à l'effondrement des prix du gaz naturel sur le marché des États-Unis, a conduit les entreprises charbonnières américaines à exporter dans un premier temps leurs excédents sur le marché européen. Le différentiel de cours a alors incité les énergéticiens européens à opter pour les centrales au charbon au détriment des unités au gaz, alors que la combustion du gaz est bien moins émettrice de gaz à effet de serre que celle du charbon.

15. En revanche, seuls les pays technologiquement peu avancés continuent de produire de l'électricité à partir de la combustion du pétrole, ainsi que ceux qui en disposent en abondance (Arabie Saoudite), ce qui constitue un pur gaspillage d'un produit appelé à se raréfier et dont les innombrables usages sont au fondement de la civilisation industrielle.

## *De la politique énergétique à l'énergie politique*

L'une des raisons pour lesquelles il est si difficile d'aboutir à des prévisions valides en matière énergétique réside donc dans le fait qu'il s'agit certes d'abord de décisions d'essence technologique, mais qui prennent en considération les contraintes politiques et économiques, et donc résultent de la confrontation plus ou moins violente d'acteurs disposés à utiliser toutes leurs ressources pour imposer les solutions qu'ils maîtrisent (ou s'imaginent maîtriser). Les politiques énergétiques sont en effet élaborées au terme de processus longs et complexes au cours desquels les différentes parties prenantes tentent de faire prévaloir leurs expertises, leurs intérêts ou leurs tropismes idéologiques. Qu'ils défendent des sources d'énergie bien déterminées ou bien des options plus ou moins dépourvues de fondement rationnel, tous ces acteurs, assimilables parfois à des groupes de pression, déploient des capacités d'action très inégales : la politique énergétique ne résulte pas uniquement de la mise en œuvre de procédures démocratiques en vigueur d'ordinaire dans les États de droit.

## *Des perspectives énergétiques foncièrement indéterminées et diversifiées*

En réalité, la problématique énergétique se trouve à la croisée des chemins. Technologiquement, il est tout à fait prématuré d'anticiper quelles seront les sources d'énergie alternatives qui tireront leur épingle du jeu à un horizon de plusieurs décennies en remplacement des énergies traditionnelles. La transition énergétique pourrait prendre la forme, du moins en partie, d'une translation entre énergies carbonées (ainsi le remplacement du charbon par le gaz naturel, bien moins émetteur de gaz à effet de serre), voire le maintien d'un certain *statu quo* au cas où seraient développées des technologies fiables et rentables de capture et stockage du dioxyde de carbone. De façon plus probable, elle devrait se traduire par un basculement vers des énergies renouvelables, inversant ainsi la révolution inaugurée au XIX<sup>e</sup> siècle lorsque les sources fossiles s'étaient progressivement substituées à la force de l'eau, du vent et à la combustion du bois.

## *L'horizon de l'électrification du monde*

Le développement des énergies du futur suppose que soient apportées des solutions fiables et rentables à des défis technologiques très complexes, notamment dans le domaine électrique : qu'il s'agisse de la production du courant (à travers, par exemple, l'augmentation du rendement des cellules photovoltaïques sans utiliser des quantités trop importantes de métaux précieux, rares et donc extrêmement onéreux), de son transport sur de très longues distances (depuis des éoliennes localisées en haute mer<sup>16</sup> ou des

16. Plus les éoliennes sont éloignées des côtes, moins la génération de l'électricité est irrégulière.

centrales solaires situées en plein désert), ou enfin de son stockage (notamment pour ajuster les périodes de production des énergies intermittentes aux phases de consommation : dans l'hémisphère Nord, la production est majoritaire entre avril et octobre, et la consommation l'emporte entre novembre et mars). L'invention d'une civilisation de l'hydrogène représente à bien des égards un idéal, mais dans l'état actuel des avancées technologiques, elle relève de l'utopie, de même que la fusion de l'atome.

## *L'Europe, symbole de la diversification des choix énergétiques*

En réalité, faute d'innovation radicale, il est tout à fait possible que l'on s'oriente vers l'imposition d'un *mix* énergétique mondial différencié en fonction des pays et des grandes régions. En ce sens, le continent européen semble d'autant plus précurseur dans la mise au point des systèmes électriques du futur que l'on y observe une grande différenciation des choix nationaux : tandis que la France joue la carte de la fission et de la fusion (à plus long terme) de l'atome, l'Allemagne investit massivement dans la filière hydrogène (une voie majeure de stockage de l'électricité produite par les énergies renouvelables intermittentes, sur lesquelles elle a misé), et les autres pays européens sont *leaders* dans les énergies renouvelables, solaire dans le cas de la péninsule ibérique, éolien et hydrolien (énergie des courants marins) en mer du Nord.

\*  
\*\*

La pluralité des paramètres, à la fois exogènes et endogènes, qui entrent en jeu dans les problématiques énergétiques rend particulièrement ardue l'élaboration de prévisions véritablement fiables. Par contraste, la démarche prospective n'en est que plus confortée : contrairement à la prévision, centrée sur une approche pour l'essentiel quantitative, elle repose en effet sur un authentique processus de créativité intellectuelle visant à rompre avec les routines de pensée suggérées par l'extrapolation des tendances précédemment constatées, ou avec les représentations fondées sur des tropismes idéologiques méconnaissant les contraintes scientifiques, économiques et politiques. Dans le domaine énergétique, la prospective sera donc d'autant plus attentive à tenter d'évaluer à leur juste degré les inerties propres aux différentes solutions technologiques, à se préserver des divers groupes de pression, à tenir compte de la nature éminemment politique des processus de décision à l'œuvre. En ce sens, cette démarche permet, au mieux, de prendre acte de l'ampleur des incertitudes énergétiques auxquelles le monde demeure confronté et d'identifier les degrés de liberté dont les acteurs disposent pour élaborer des stratégies aptes à relever effectivement un tel défi. ■

## Annexe : un bilan des prévisions de demande mondiale de l'AIE

Afin de tester la validité des résultats en matière de prévision énergétique, les principales conclusions en termes de demande mondiale des rapports annuels (*World Energy Outlook*) de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), pour 1994, 1995 et 1996, sont comparées à la situation constatée pour l'année 2010, qui constituait l'horizon le plus éloigné des prévisions alors publiées : à partir de l'édition de 1997, les extrapolations s'étendent jusqu'en 2020, ce qui rend l'exercice d'évaluation *ex post* impossible pour le moment.

Force est de constater que les prévisions de l'AIE se trouvent dans l'ensemble rétrospectivement confortées. Les quatre seuls écarts significatifs concernent une surestimation de la consommation de pétrole des pays non-OCDE, une moindre dépendance de l'OCDE aux importations pétrolières (liée à l'extraction des hydrocarbures de schiste aux États-Unis et à la transformation des sables bitumineux au Canada), une surévaluation de la demande de gaz naturel dans les pays non-OCDE (dont la croissance a prioritairement mobilisé le charbon et le pétrole, deux sources d'énergie moins capitalistiques), et une sous-estimation — au demeurant limitée — de la croissance des énergies renouvelables.

**Tableau 2 — Prévisions de la demande pour les principales sources d'énergie (croissance annuelle en %)**

	Prévisions en 1994-96 à l'horizon 2010	Données observées en 2010	Écart
Demande d'énergie primaire	2,1	2,0*	- 0,1
Demande de pétrole Monde (hypothèse basse)	1,7	1,5	- 0,2
Demande de pétrole Monde (hypothèse haute)	1,9	1,5	- 0,4
Demande de pétrole OCDE	0,4	0,6	+ 0,2
Demande de pétrole Non-OCDE (hypothèse basse)	3,3	2,7	- 0,6
Demande de pétrole Non-OCDE (hypothèse haute)	3,8	2,7	- 1,1
Taux de dépendance pétrolière de l'OCDE (en %)	70	61*	- 9
Part du pétrole dans le <i>mix</i> énergétique de l'OCDE (en %)	48	53	+ 5
Demande de gaz naturel OCDE	2,1	2,0*	- 0,1
Demande de gaz naturel Non-OCDE	5,6	2,9*	- 2,7
Demande de charbon Monde	2,1	2,4*	+ 0,3
Énergies renouvelables	7,7	9,5*	+ 1,8
Émissions de CO <sub>2</sub> (hypothèse basse)	1,5	1,9*	- 0,4
Émissions de CO <sub>2</sub> (hypothèse haute)	2,0	1,9*	- 0,1

Sources : AIE, *BP Statistical Review* (\*), calculs des auteurs.

**Tableau 3 — Demande additionnelle en énergie primaire par rapport à 1991 (en millions de tonnes équivalent pétrole)**

	Prévisions en 1991- pour 2010 (AIE)	Données obser- vées en 2010 (BP)	Écart
OCDE - Amérique du Nord	569,3	383,0	- 186,3
OCDE - Europe	362,4	218,2	- 144,2
OCDE - Asie	224,0	110,1	- 113,9
<b>Total</b>	<b>1 155,7</b>	<b>711,3</b>	<b>- 444,4</b>
Chine	757,0	1 821,7	+ 1 064,7
Moyen-Orient	326,7	477,9	+ 151,2
Afrique	175,9	167,7	- 8,2
Amérique latine	345,4	376,3	+ 30,9
Asie du Sud	324,2	406,0	+ 81,8
Asie de l'Est	533,3	547,7	+ 14,4
<b>Total</b>	<b>2 462,5</b>	<b>3 797,3</b>	<b>+ 1 334,8</b>

Sources : AIE, BP, calculs des auteurs.

Compte tenu de l'importance des transformations que l'économie mondiale a connues pendant cette période, la qualité des prévisions de l'AIE est donc à souligner. Cependant, l'ampleur des ruptures majeures liées à la mondialisation a été sous-estimée, et certaines évolutions qualitatives (ainsi les grands projets porteurs d'innovations de rupture) ont été méconnues ou passées, probablement de façon intentionnelle, sous silence : il est vrai que les rapports des organismes internationaux font montre de façon systématique, outre un certain tropisme optimiste, d'une grande prudence vis-à-vis des innovations dont la viabilité n'est pas avérée. De plus, si la grande crise de 2008 n'était pas survenue (par principe, les crises sont très difficiles à anticiper), les écarts auraient été plus prononcés dans la mesure où l'AIE a sous-estimé les ruptures intervenues dans l'ordre économique mondial pendant la phase intensive de mondialisation du début du XXI<sup>e</sup> siècle. Enfin, les prévisions de l'AIE portent sur le monde considéré dans sa globalité, de sorte que le bilan satisfaisant peut résulter du jeu des compensations entre surestimations et sous-estimations.

Les prévisions régionales de la demande d'énergie primaire exprimées en millions de tep (tonnes équivalent pétrole) corroborent globalement les résultats précédents : une bonne anticipation d'ensemble mitigée par une réelle difficulté à percevoir les ruptures les plus significatives et certaines trajectoires locales. Les quantités d'énergie consommées par l'OCDE (dans sa configuration de 1990-1996) ont été surestimées de 444 millions de tep, tandis que les écarts pour la Chine (1 064 millions de tep) ainsi que pour le Moyen-Orient (151 millions de tep) sont tout aussi considérables mais dans le sens inverse, ce qui dénote la relative sous-évaluation de l'intensité de l'industrialisation de l'empire du Milieu et de la masse des revenus procurés par le troisième choc pétrolier. Quant à l'absence de prévision pour la Communauté des États indépendants et les pays de l'Europe centrale et orientale, elle traduit les interrogations de l'AIE relatives à la capacité de l'ex-URSS à surmonter sa crise et à la vitesse de rattrapage de l'ancienne Europe communiste. ■