

futuribles

analyse et prospective

Quelles énergies pour demain ?

**LES SCÉNARIOS DE LA DEMANDE
LES ÉNERGIES RENOUVELABLES
AGRICULTURE ET ÉNERGIE
NÉGATEP OU NÉGAWATT ?
LE NUCLÉAIRE APRÈS FUKUSHIMA**

futuribles

NUMÉRO 376 • JUILLET-AOÛT 2011

- L'énergie du futur** 3
Hugues de Jouvenel
- Scénarios de la demande en énergie :
une rétrospective critique** 5
Tirer les enseignements du passé au profit de l'exploration du futur
*Marie-Hélène Laurent, François Cattier, Dominique Osso
et Prabodh Pourouchottamin*
- Les énergies renouvelables : jusqu'où ?** 29
Cédric Philibert
- L'efficacité énergétique dans le bâtiment
en Méditerranée** 47
Henri-Luc Thibault et El Habib El Andaloussi
- Le scénario Négatep** 61
Un scénario de lutte contre le réchauffement climatique
Claude Acket et Pierre Bacher
- La révolution négaWatt est-elle réalisable ?** 81
Promesses et limites d'un scénario de rupture
Bernard David
- Prospective Agriculture énergie 2030** 99
Comment l'agriculture s'adaptera-t-elle aux futurs défis énergétiques ?
Céline Laisney, Fabienne Portet et Julien Vert

FORUM

- Le nucléaire, solution d'avenir ou du passé ?** 117
Corinne Lepage
- L'énergie nucléaire après Fukushima** 123
Bernard Bigot
- Les conséquences de l'accident de Fukushima** 129
Michel Drancourt

TRIBUNE EUROPÉENNE

- L'Europe et ses objectifs énergétiques** 139
Jean-François Drevet

- ACTUALITÉS PROSPECTIVES** 145

- BIBLIOGRAPHIE** 155

- ABSTRACTS** 168

L'ÉNERGIE DU FUTUR

L'éditorial d'Hugues de Jouvenel

Dans mon éditorial de janvier 2006 sur le développement durable ¹, je dénonçais l'irresponsabilité des soixante-huitards qui, après s'être élevés contre l'évangile de la croissance, une fois arrivés aux affaires n'avaient entrepris aucune des réformes profondes qui s'imposaient, en France comme au plan international. Je soulignais notamment le caractère insoutenable d'un modèle de développement dont nous savons depuis longtemps qu'il repose sur une exploitation outrancière des ressources limitées de la planète, et génère des perturbations profondes de l'écosystème. Je rappelais en outre que, dès lors que les pays émergents tendraient à adopter le même mode de croissance que les pays occidentaux — au nom de quoi le leur reprocherait-on ? —, se poserait avec une plus grande acuité la question de la survie de l'humanité.

Cinq ans plus tard, force est de constater que les progrès accomplis sur le front du développement durable sont demeurés bien limités, sinon insignifiants. Ainsi est-on fondé à craindre que, quels que soient les moyens mis en œuvre, y compris la « croissance verte », la seule issue face au défi énergétique et au chan-

gement climatique réside dans l'adoption de modèles de développement alternatifs et de modes de vie plus sobres ².

Depuis la publication de notre numéro spécial consacré, en avril dernier, aux perspectives énergétiques et au changement climatique, le débat — notamment en raison de la catastrophe de Fukushima — a repris une certaine vigueur, en particulier entre les tenants de l'énergie nucléaire et ceux des énergies renouvelables, sans que, pour le profane, soient exposés de manière parfaitement limpide les coûts et bénéfices directs et indirects, à moyen et à long termes, de chacune de ces deux filières, encore moins les modalités et les délais de transition de l'une vers l'autre, pour autant que cette transition soit techniquement réalisable.

Le moins que l'on puisse dire est qu'en la matière, le public, si prompt à s'enflammer sous l'effet des événements sans nécessairement en tirer toutes les conséquences, reste très dépourvu d'informations pertinentes pour débattre efficacement. En témoignent, par exemple, la confusion souvent faite entre l'énergie primaire, l'énergie finale et l'énergie utile ³, a

1. Voir l'éditorial du numéro spécial « Perspectives énergétiques et effet de serre ». *Futuribles*, n° 315, janvier 2006.

2. Voir mon éditorial « La croissance sobre », et les articles de Benjamin Dessus et Patrick Criqui dans le numéro spécial « Perspectives énergétiques et changement climatique ». *Futuribles*, n° 373, avril 2011.

3. Voir l'encadré page 7 de ce numéro.

fortiori l'ignorance dans laquelle nous sommes, côté nucléaire, des risques réels encourus et des coûts du traitement des déchets ou du démantèlement des centrales ; et côté énergies renouvelables, des investissements requis, des coûts de fonctionnement, des délais de montée en charge et de leurs effets aussi bien bénéfiques que pervers.

De manière plus générale, il est saisissant d'observer combien l'attention se porte prioritairement sur la production d'énergie plutôt que sur notre capacité à réduire la demande (d'énergie comme de toutes les autres ressources naturelles, y compris minérales et minières) par fonction. Non par le procédé hypocrite consistant à délocaliser hors des territoires nationaux les productions les plus consommatrices et polluantes, comme c'est le cas fréquemment, les importations de biens ne faisant qu'augmenter à due proportion et les frontières n'étant qu'illusions face aux limites de la biosphère, mais en repensant beaucoup plus radicalement notre mode d'organisation économique et sociale qui, fondé sur l'illusion d'une énergie surabondante et peu coûteuse, la gaspille sans réserve.

Cela renvoie à une problématique déjà ancienne, celle de l'efficacité énergétique et de la sobriété dont l'Europe, si d'aventure elle entendait redevenir pionnière en matière de modèle de développement, pourrait être le terrain d'expérimentation privilégié. Il ne suffirait pas alors d'attendre vainement que, surmontant

ses divisions qui n'ont peut-être jamais été aussi vives depuis l'instauration du marché unique, elle se dote d'un pouvoir et d'un projet communs. Il faudrait aussi que, à tous les niveaux, les Européens repensent leurs manières d'habiter, de se déplacer, de se nourrir, de travailler..., pour arriver à construire une société décarbonée efficace⁴. Il s'agirait certes d'une grande ambition — non d'une illusion, d'un projet de décroissance ou d'un retour au Moyen Âge. Mais il s'agirait d'un objectif que nous ne saurions poursuivre sans une remise en cause très fondamentale des habitudes auxquelles nous sommes tant attachés.

Pourtant, des marges de progrès existent au niveau des modes de vie, des collectivités locales, de l'organisation des activités, qu'elles soient professionnelles ou de loisir. En témoignent les expériences novatrices menées dans le domaine de la mobilité⁵, notamment pour limiter le transport routier. En témoignent également nombre de travaux sur les circuits courts de distribution, notamment de produits alimentaires, et les recommandations qui découlent de l'exercice de prospective « Agriculture énergie 2030 »⁶.

En définitive, l'énergie qui nous fait le plus défaut est peut-être celle de la volonté de changer résolument de modèle de développement alors pourtant que, année après année, nous nous approchons, au plan tant écologique que social, d'une situation manifestement insoutenable. ■

4. Voir JANCOVICI Jean-Marc. *Changer le monde. Tout un programme !* Paris : Calmann-Lévy, 2011.

5. Telle l'étude réalisée par Futuribles International sur la « prospective de la mobilité dans les villes moyennes françaises ».

6. Présenté p. 99 de ce numéro.

Scénarios de la demande en énergie : une rétrospective critique

TIRER LES ENSEIGNEMENTS DU PASSÉ
AU PROFIT DE L'EXPLORATION DU FUTUR

PAR MARIE-HÉLÈNE LAURENT, FRANÇOIS CATTIER,
DOMINIQUE OSSO ET PRABODH POUROUCHOTTAMIN ¹

Dans son article sur les perspectives pétrolières et gazières paru en avril dernier (n° 373), Jean Laherrère avait montré (p. 25) combien les prévisions des prix du gaz naturel aux États-Unis depuis 1985 s'étaient révélées éloignées de leur évolution réelle constatée a posteriori. De telles comparaisons rétrospectives sont assez rares, ne serait-ce que parce que les prévisionnistes et autres artisans d'études sur le futur préfèrent regarder vers l'avenir que vers le passé. Pourtant, comme le montre ici l'article de Marie-Hélène Laurent, François Cattier, Dominique Osso et Prabodh Pourouchottamin, qui se sont efforcés d'effectuer une telle analyse rétrospective des études prospectives de la demande d'énergie, elles sont riches d'enseignements.

Après avoir précisé la nature des travaux analysés (prévisions, prospectives, projections), ce qu'ils couvrent et la façon dont ils sont élaborés (en particulier l'utilisation d'un scénario de référence), les auteurs — quoique prudents quant à la pertinence de telles comparaisons rétrospectives — se posent trois questions. Premièrement, s'est-on trompé et si oui, dans quelle mesure et dans quel sens ? Ensuite, pourquoi se trompe-t-on ? Ils montrent ainsi les différents types d'erreur possibles (trajectoire, tendance, variabilité...) et leur impact, l'importance de la qualité des hypothèses et du profil des auteurs impliqués, et les leçons qui en découlent. Enfin, s'interrogeant sur la gravité des erreurs constatées, les auteurs relativisent : d'une part, elles aident à affiner l'analyse et les risques d'erreur potentiels

1. Chercheurs à EDF R&D, la branche Recherche-développement d'Électricité de France.

dans de tels exercices ; d'autre part, elles permettent de mieux appréhender en dynamique les systèmes de consommation, d'identifier les secteurs plus difficiles à faire évoluer, et de peaufiner la chronologie des mesures à mettre en œuvre. L'essentiel étant, dans toute prospective, que les hypothèses et scénarios soient communiqués avec la plus grande transparence possible. S.D. ■

L'objet de cet article n'est pas de critiquer les résultats ou les auteurs d'études passées, mais d'en tirer quelques enseignements : comment utilise-t-on ces études, quelles en sont les hypothèses déterminantes, celles qu'il est difficile de renseigner, quels sont les défauts les plus courants ? Le but est de donner quelques clefs de lecture afin que le lecteur ou l'utilisateur d'études prospectives soit mieux à même d'en comprendre et d'en apprécier les résultats.

L'article se limite aux analyses prospectives de long terme de la demande en énergie publiées depuis une vingtaine d'années. Les détails de la constitution du *mix* de l'offre ne seront pas abordés, même s'il est bien clair que production et demande sont liées et que l'on ne peut traiter l'une sans l'autre. Une analyse des consommations projetées en fonction du type d'énergie consommée est d'ailleurs proposée.

Pour l'avoir pratiqué, les auteurs savent combien réaliser une étude prospective est un exercice délicat. Il convient donc de rester modeste. Ce regard n'est pas exhaustif, il pointe quelques exemples afin d'illustrer les causes les plus courantes des erreurs d'interprétation des études prospectives que nous réalisons ou des analyses comparatives que nous en faisons. Nous recommandons donc au lecteur d'appliquer à cet article le même esprit critique que nous lui souhaitons pour ses futures analyses d'études prospectives.

Prévision, prospective, projection : de quoi parle-t-on ?

La principale source d'erreur d'interprétation des études prospectives et de leurs résultats vient de la confusion entre des concepts différents ou du rapprochement de résultats qui ne sont en pratique pas comparables. Avant tout développement, il est donc nécessaire de préciser quelques définitions et méthodes, ou du moins, car elles ne font pas forcément consensus, le sens que nous leur donnons dans cet article.

La jungle des indicateurs, des unités et des stades de la chaîne énergétique

La qualité première d'un scénario est la cohérence de l'histoire qu'il raconte. Cette cohérence doit se retrouver dans les périmètres des secteurs de

AU COMMENCEMENT ÉTAIT L'ÉNERGIE PRIMAIRE...



L'énergie primaire (E_p) est une énergie n'ayant subi aucune conversion, comme le pétrole brut ou le charbon. L'énergie finale (E_f) est celle qui est livrée sur le lieu où le service énergétique est rendu. Dans certaines filières énergétiques, comme le gaz, il y a une faible différence entre la comptabilité en énergie primaire et celle en énergie finale car le produit brut nécessite peu de transformation pour être utilisable. Dans d'autres filières, comme l'électricité et, dans une moindre mesure, les carburants liquides, il faut transformer des énergies primaires pour obtenir des éner-

gies secondaires (électricité, hydrogène, carburants).

L'énergie finale est celle livrée à l'utilisateur *in fine* du service énergétique, elle lui est donc facturée à ce stade. Mais il existe encore des pertes entre l'énergie consommée et celle réellement utile à la réalisation du service énergétique. Celles-ci dépendent du rendement de l'équipement utilisé. Ce dernier stade est qualifié d'« énergie utile », car c'est bien à ce stade que le service attendu est rendu.

M.-H.L. et alii

consommation étudiés et les unités de mesures utilisées ². Les causes de comparaisons inappropriées sont nombreuses, la plus importante nous semble être celle du stade énergétique auquel les consommations sont comptabilisées.

La chaîne énergétique se décline en trois stades : primaire, final, utile (cf. encadré ci-dessus). La comptabilité de la production d'énergie s'exprime toujours au stade primaire alors que lorsque l'on parle de consommation d'énergie, les quantités sont le plus souvent comptabilisées en énergie finale, celle qui est livrée au client et lui est facturée. Dans certains cas, la demande globale en énergie pourra aussi être exprimée en énergie primaire. Avant de rapprocher production et consommation d'énergie, ou de comparer des études, il convient donc de s'assurer que les quantités sont exprimées au même stade énergétique.

Dans le passage de l'énergie primaire à l'énergie finale, il faut aussi considérer les pertes d'acheminement, qui créent une différence entre quantités d'énergie produites et consommées.

2. Qui peuvent être très variées : joule (J), kilowattheure (kWh), tonne équivalent pétrole (tep), British Thermal Unit (BTU), *short tons*, *long tons*, etc.

D'autres problèmes de périmètres se posent :

— On peut comptabiliser l'énergie consommée en prenant en compte le seul service rendu (consommation directe) ou la consommation d'énergie nécessaire à la fabrication des biens et mise à disposition d'un service. Dans ce dernier cas, on parle de consommation indirecte ou d'« énergie grise³ ». Ce type de comptabilité pose la difficile question des périmètres et des méthodes de l'ACV (analyse en cycle de vie) lors de leur utilisation dans des analyses énergétiques.

— Les périmètres entre secteurs de consommation peuvent être flous, surtout pour le tertiaire qui est souvent ce qui reste une fois que l'on a identifié les secteurs plus traditionnels. De plus, les différences entre tertiaire ou industrie peuvent varier d'un pays à l'autre.

Pour les émissions de gaz à effet de serre (GES), la filière énergétique est souvent comptabilisée comme un secteur à part entière, au même titre que les secteurs de consommation. L'impact pour l'électricité est important car les émissions de GES dues à la production électrique sont alors affectées à la filière énergétique et non aux secteurs consommateurs (contrairement aux combustibles, l'électricité n'émet pas de GES lors de sa consommation mais au moment de sa production).

La nature commerciale ou non (appelée « non commerciale » ou « traditionnelle ») de l'énergie a un impact sur la robustesse de la quantification des consommations. C'est le bois (biomasse) qui est le plus concerné. Son usage est très important dans les pays en développement (cuisson) et non négligeable dans certains pays développés (chauffage). En France, seulement 10 % des 80 TWh_{ef}⁴ de bois annuellement consommés dans les logements pour le chauffage passent par un circuit commercial.

Enfin, certains indicateurs utilisés pour apprécier les résultats des études de prospective énergétique sont très agrégés, ce qui les rend difficiles à décrypter. C'est le cas de tous les indicateurs unitaires (consommation/mètre carré, consommation/tonne d'acier produit...), mais l'intensité énergétique, très utilisée dans les analyses économiques, est probablement la plus emblématique. C'est un indicateur qui peut s'exprimer sous de nombreuses variantes et unités, ce qui rend les interprétations délicates⁵. Ces indicateurs sont trompeurs : leur amélioration ne doit pas faire oublier qu'ils mesurent des

3. C'est par exemple la quantité d'énergie nécessaire à la fabrication et la commercialisation d'un véhicule (on parle de consommations « du puits à la roue ») ainsi qu'à la construction des infrastructures routières.

4. TWh : térawattheure, soit un milliard de kilowattheures ; TWh_{ef} : térawattheure d'énergie finale ; 1 Mtep = 11,63 TWh_{ef}.

5. L'intensité énergétique d'une activité ou d'une zone géographique est la quantité d'énergie nécessaire à la création d'une unité de richesse à l'échelle d'une année et pour le périmètre défini. Sous un même nom peuvent se cacher bien des définitions : intensité primaire ou finale, par rapport au PIB (produit intérieur brut) aux taux de change du marché ou en parité de pouvoir d'achat, par rapport à la valeur ajoutée...

consommations unitaires dont la baisse ne parvient pas toujours à contenir la croissance du nombre de tonnes d'acier à produire ou de mètres carrés à chauffer, la résultante étant une consommation globale en hausse.

Prévision ou prospective ?

Ces termes sont parfois utilisés de manière ambiguë⁶. On en propose ici deux définitions.

Une prévision de consommation d'énergie (*forecasting* en anglais) vise à quantifier les projections de consommation d'énergie les plus probables, donc réalistes, pour un contexte donné. La précision des valeurs absolues est importante. L'exercice est le plus souvent réalisé à un horizon de court terme (généralement moins de 5 ans). Les prévisions sont faites dans un but opérationnel, comme une décision d'investissement. Si elles sont réalisées par des entreprises privées, elles font alors rarement l'objet de publications. En revanche, les instances publiques mettent à disposition leurs études de prévision : on peut citer le « Bilan prévisionnel annuel » qui est une obligation de la responsabilité du Réseau de transport électrique (RTE)⁷.

Les scénarios de prospective de la demande en énergie (*foresight*⁸ en anglais) sont des études exploratoires qui répondent à des questions commençant par « si » : si on prend (ou ne prend pas) telle décision, quels en sont les impacts énergétiques ? Par nature, elles expriment des points de vue (mises en perspective) et leur valeur réside plus dans leur interprétation que dans leurs résultats bruts. Elles cherchent en général à quantifier l'impact de décisions actuelles ou futures sur les consommations d'énergie de long terme (plus de 20 ans), ou à décrire les étapes nécessaires pour atteindre un objectif (approche normative réalisée par itération ou par rétroprojection⁹). La précision des valeurs absolues est moins importante qu'en prévision et les résultats quantifiés s'apprécient plus en valeurs relatives, par rapport à un scénario de référence. Les scénarios ne sont pas probabilisés. Compte tenu du caractère exploratoire de l'exercice, ils peuvent intégrer des ruptures potentielles. Les écarts entre scénarios peuvent donc être quantitativement importants. La réalité future est censée être encadrée par les scénarios extrêmes. Les études prospectives publiées sont nombreuses, elles s'accompagnent de recommandations et appuient les messages que leurs auteurs souhaitent porter.

La prévision est souvent le résultat d'un modèle mathématique calé sur le passé (donc tendanciel) dont la qualité dépend en grande partie des don-

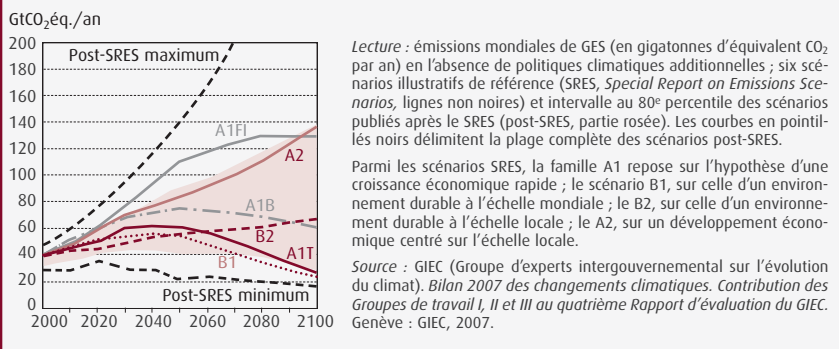
6. D'autant plus que certains termes sont indifféremment utilisés pour les deux : projection (*projection* en anglais) et perspective (*outlook* en anglais).

7. GESTIONNAIRE DU RTE. *Bilan prévisionnel de l'équilibre offre-demande d'électricité en France*. Paris : RTE, 2009, 172 p.

8. Autres appellations possibles : *future studies*, *forward looking activities* ou *prospective studies*.

9. Ou *backcasting* en anglais.

Graphique 1 — Scénarios d'émissions de gaz à effet de serre pour la période 2000-2100 en l'absence de politiques climatiques additionnelles



nées d'entrée du modèle. Elle peut cependant intégrer des ruptures avec la tendance passée à partir du moment où celles-ci sont connues à la date de l'exercice (nouvelle loi, arrêt de consommation d'un secteur donné). Les exercices de prospective sont faits, eux, pour décrire tout événement possible. L'analyse qui est alors réalisée est de type « si... alors », ce qui n'empêche pas d'utiliser des modèles mathématiques mais que l'on adaptera en fonction des décisions que l'on cherche à tester.

L'amplitude des futurs possibles décrits dans les études prospectives peut donc être très large, comme ceux décrits dans le graphique 1, au risque de laisser le lecteur perplexe s'il n'a pas lu la centaine de pages qui tirent les enseignements de telles études, ou s'il espère en utiliser directement les résultats. Quelques clefs de lecture sont donc nécessaires.

Quelle référence ?

Dès lors que les résultats d'une étude prospective s'apprécient le plus souvent de façon relative (entre eux et surtout par rapport à une référence), il convient de s'entendre sur la nature de cette référence et sur la façon de s'y référer. Les définitions qui vont suivre ne font pas consensus car les frontières entre concepts sont peu étanches. Nous proposons ci-dessous une interprétation possible.

La plupart des études prospectives intègrent un scénario de référence (*a minima* implicite) qui est projeté : c'est-à-dire que pour une même date future, on compare le résultat du scénario étudié par rapport à celui dit « de référence ». D'autres études comparent les résultats futurs par rapport au présent ou à une situation réalisée, donc à une date passée.

La plupart des références des études prospectives sont de type « laisser-faire » ou « tendanciel ». Les définitions ne sont pas forcément les mêmes pour tous les auteurs, nous en proposons la version suivante :

— « Laisser-faire » signifie projeter en tenant compte de l'évolution future des variables d'activité (croissance de la population, évolution du PIB) des secteurs étudiés sans intégrer de nouvelle mesure de politique énergétique. Les consommations suivent alors l'évolution structurelle des secteurs de consommation.

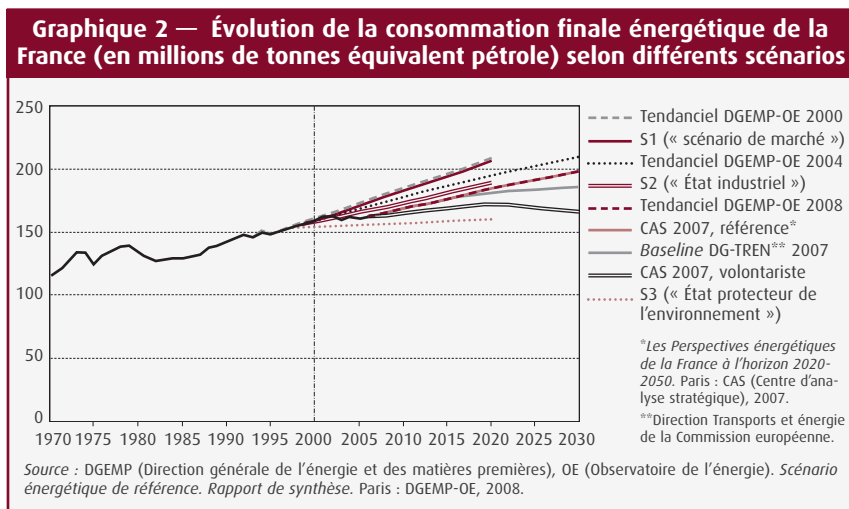
— « Tendanciel » (*Business As Usual* ou BAU en anglais) correspond à un scénario qui prolonge les tendances passées, parfois d'un point de vue purement mathématique, ou qui intègre des actions non encore programmées mais qui sont dans la tendance (c'est-à-dire déjà envisagées ou décidées). Par exemple, il paraît aujourd'hui peu probable d'arrêter toute politique de maîtrise de la demande en énergie (MDE) ; dans un scénario de référence tendanciel, on doit donc prévoir des actions d'économie d'énergie non encore mises en place.

La différence entre ces deux notions reste cependant très subjective. Il n'est pas rare qu'une référence de type laisser-faire (au sens défini ici) soit appelée tendancielle, et *vice versa*. Ce n'est guère important. Ce dont il faut en revanche s'assurer est que l'on comprend bien la nature des événements qui sont pris en compte dans la référence, quel que soit son nom.

La référence ne correspond donc pas toujours à un tendanciel et ne représente pas non plus le scénario le plus probable. La référence représente même rarement le plus probable pour au moins deux raisons : 1) si l'on explore les futurs possibles, c'est souvent que l'on cherche à se démarquer de la tendance passée qui, prolongée, pose des problèmes ; 2) le tendanciel décrit un passé qui se prolonge dans l'avenir sans ruptures ou changements, alors que l'on est à peu près sûr qu'il y aura des changements même si l'on se trompe sur ceux-là (jeux d'acteurs, politiques, ruptures technologiques...). Le scénario le plus probable peut aussi servir de repoussoir en montrant un futur possible que l'on ne souhaite pas voir se réaliser. Les consommations projetées d'une référence « laisser-faire » sont généralement les plus élevées du jeu de scénarios étudié, elles sont donc supérieures à celles du tendanciel. Il est donc important de ne pas confondre référence et tendance, et, avant de comparer le résultat d'un scénario à sa référence, il convient de s'assurer de la nature de cette dernière. Tous les intitulés ne sont pas aussi explicites que le « scénario de référence à caractère tendanciel » publié par la Direction générale de l'énergie et des matières premières (DGEMP) en 2004¹⁰.

L'objectif européen d'une baisse de la consommation d'énergie primaire de 20 % en 2020 s'apprécie par rapport à une référence projetée, représentant la consommation énergétique qu'aurait eue la France en 2020 si les mesures supplémentaires nécessaires pour atteindre cet objectif n'avaient pas été mises en œuvre. Dans ce type d'exercice qui rend compte des ambitions affichées, la nature de la référence est cruciale. Celle-ci n'est pourtant pas toujours explicite pour le lecteur.

10. Scénario énergétique tendanciel à 2030 pour la France. Paris : DGEMP-OE (Observatoire de l'énergie), 2004.



La référence peut aussi être une situation passée. C'est le cas des obligations de réduction des émissions de GES imposées dans le cadre des accords de Kyoto (signés en 1997) : elles sont évaluées par rapport à celles de l'année 1990 pour la plupart des États concernés.

Comparer les résultats d'études prospectives passées avec la réalité est-il pertinent ?

La réponse est claire : autant comparer la réalité avec les résultats d'une étude de prévision a un sens, autant le faire pour une étude prospective revient à comparer des résultats qui ne sont pas comparables. Comme nous l'avons défini plus haut, une étude prospective répond à la question des impacts d'un ou de plusieurs événements. Si cette combinaison d'événements n'a pas eu lieu, on compare un contexte projeté différent de celui qui s'est finalement réalisé. La comparaison serait opportune si l'on refaisait l'étude prospective en intégrant les événements tels qu'ils se sont réellement passés (le bon PIB, la bonne population, etc.). Ces études seraient très pertinentes mais n'existent quasiment pas, à l'exception notable mais partielle des travaux de Hans Linderoth ¹¹. Elles n'intéressent presque personne : les commanditaires d'études et ceux qui les réalisent préfèrent mobiliser leurs moyens sur des travaux permettant d'éclairer l'avenir plutôt que d'expliquer le passé.

11. Travaux montrant que même en corrigeant les prévisions avec le PIB réalisé, il persiste une erreur positive qui peut s'expliquer dans une certaine mesure par le fait que l'élasticité au prix est plus forte en période d'augmentation des prix des énergies que pendant une période de baisse des prix (irréversibilité de la demande). Voir LINDEROTH Hans. « Forecast Errors in IEA-Countries' Energy Consumption ». *Energy Policy*, vol. 30, n° 1, 2002, pp. 53-61.

Il n'est pas non plus pertinent de comparer la réalité avec les consommations estimées à court terme dans une étude à visée de long terme. Dans ce type d'étude, on tient peu compte des situations conjoncturelles présentes (telle une sortie de crise). Les premières années sont donc très approximatives. On peut de plus arriver à un même résultat à l'horizon final visé par une étude en étant passé par des situations intermédiaires très différentes suivant que l'on a choisi un chemin asymptotique ou exponentiel (voir graphique 5, *infra*).

Après avoir dit combien les différences entre prospective et prévision sont importantes, il faut bien reconnaître qu'en pratique cette frontière est poreuse. Certaines études ne revendiquent d'ailleurs pas une appartenance précise et il est toujours tentant de comparer les résultats chiffrés des études prospectives avec la réalité. Bien que nous ayons longuement dit combien cela était inadéquat, nous allons nous empresser de le faire.

Se posent alors trois questions. S'est-on trompé ; si oui, de beaucoup, par rapport à quoi, et dans quel sens ? Pourquoi se trompe-t-on et est-ce que l'on progresse dans la qualité des prospectives / prévisions ? Et finalement, est-ce grave de se tromper ?

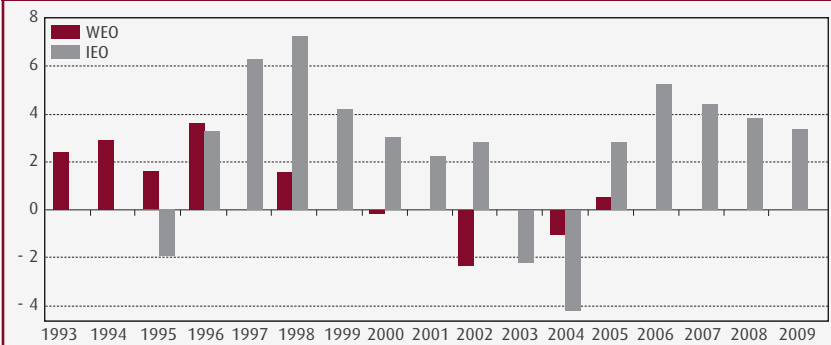
S'est-on trompé ?

Pour les études de périmètre géographique important, « l'erreur » relative entre la valeur prévue et celle réalisée est généralement faible, de l'ordre de 2 % à 4 % (voir graphique 3, page suivante). À l'échelle mondiale, il faut cependant noter que cela représente l'équivalent de la consommation du Royaume-Uni et de la France réunis (470 Mtep¹² par an d'énergie primaire).

L'observation des écarts de prévisions fait ressortir plusieurs sous-périodes (graphique 3). Avant 2001, et à l'exception de 1998 marquée par l'après-crise asiatique, la surestimation est forte. Les scénarios de référence reposent sur des anticipations élevées de croissance économique. Les scénarios 2002 à 2003 sous-estiment plutôt la consommation globale, ce qui pourrait être interprété comme l'anticipation d'un impact important des prix de l'énergie, en croissance forte sur cette période. Enfin, à partir de 2005, la surestimation redevient forte. Deux explications peuvent être avancées. D'une part, la croissance économique des pays émergents depuis les années 2000, et ce malgré des prix de l'énergie forts, entretient l'idée que cette tendance peut se prolonger durablement. D'autre part, les exercices antérieurs à 2008, n'ont pas pu prendre en compte les effets de la crise économique de 2008-2009 qui a contribué à réduire significativement le niveau de consommation réalisée en 2010. Cette incapacité des prévisions à prendre en compte les ruptures est une des causes d'erreur, sur laquelle nous reviendrons par la suite.

12. Millions de tep (tonnes équivalent pétrole) ; une tep représente l'équivalence en contenu énergétique d'une tonne de pétrole.

Graphique 3 — Écarts (en %) entre la consommation mondiale d'énergie pour l'année 2010 et les projections issues de scénarios de référence en fonction de l'année de prévision



Source : calculs* des auteurs d'après les études WEO (*World Energy Outlook*) publiées par l'Agence internationale de l'énergie (AIE) de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques, Paris) en 1993, 1994, 1995, 1996, 1998, 2000, 2002, 2004, 2005, et 2010 ; et les études IEO (*International Energy Outlook*) publiées par l'EIA (Energy Information Agency) du Department of Energy des États-Unis (USDOE, Washington, D.C.) de 1995 à 2009. Seules les études WEO donnant des estimations explicites pour l'année 2010 sont prises en compte.

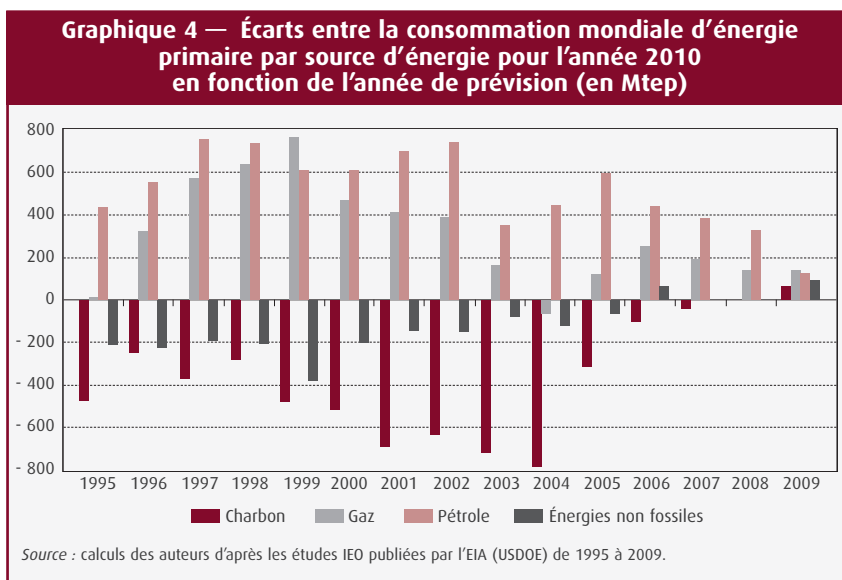
*Méthodologie de calcul : les études retenues pour cette comparaison répondent à plusieurs critères. Elles sont mondiales et multi-énergies, elles disposent d'un historique de projections de plusieurs années et donnent des projections pour l'année 2010. On s'est abstenu d'obtenir le point 2010 par interpolation, ce qui explique l'absence de WEO après 2005. Afin de comparer ces études (dont les bases statistiques diffèrent), les projections ont été corrigées pour tenir compte des écarts entre les années de référence de ces études et les valeurs historiques de référence (à l'aide de la base de données Enerdata). La valeur 2010 utilisée comme référence n'est encore qu'une estimation, mais la valeur statistique définitive ne devrait pas être trop éloignée de celle proposée ici.

La littérature scientifique basée sur l'analyse de scénarios au périmètre international (pays couverts par l'Agence internationale de l'énergie, AIE, ou monde) confirme ces faibles valeurs d'erreur relative. Elle met cependant en évidence que la cause vient le plus souvent d'une compensation entre erreurs opposées. Ainsi, H. Linderoth¹³ montre, pour les différents pays de l'AIE, que les erreurs de prévision sont importantes au niveau d'un secteur de consommation mais qu'elles se compensent au global : le secteur industriel est surévalué, celui des transports est sous-évalué, et le plus fiable (« erreur » proche de zéro) est le secteur des bâtiments (résidentiel et tertiaire). La surestimation des consommations de l'industrie est souvent imputée à une mauvaise appréciation de la croissance économique. James Winebrake et Denys Sakva¹⁴ font le même constat pour les États-Unis dans le secteur du transport en plus de celui de l'industrie.

Concernant les projections par formes d'énergie, les consommations mondiales de pétrole et de gaz ont souvent été surestimées, contrairement à celles du charbon qui ont été sous-évaluées (graphique 4). Le nucléaire et les énergies renouvelables sont généralement mieux pris en compte que les énergies

13. *Op. cit.*

14. WINEBRAKE James J., SAKVA Denys. « An Evaluation of Errors in US Energy Forecasts: 1982-2003 ». *Energy Policy*, vol. 34, n° 18, 2006, pp. 3475-3483.



fossiles. Des projections qui pouvaient apparaître relativement fiables au niveau global le sont ainsi beaucoup moins par type d'énergie. De même, l'étude des projections de l'IEO¹⁵ par régions fait apparaître une surestimation systématique de la consommation des pays industrialisés¹⁶, compensée en partie au niveau mondial par la sous-estimation de celle des pays en développement¹⁷.

L'observation des erreurs de prévision montre également un faible effet d'apprentissage. Ainsi, si depuis 2006, l'IEO a estimé avec de plus en plus de fiabilité le niveau de consommation 2010 — ce qui est aussi facilité par la proximité croissante de l'échéance —, les études les plus anciennes ne sont pas nécessairement les plus éloignées du réalisé. Les IEO 1995 et 1996 ont ainsi projeté la valeur 2010 avec moins de 3 % d'erreur. Ceci est confirmé par J. Winebrake et D. Sakva qui n'observent pas d'effet d'apprentissage dans l'exercice de prévision, les méthodes ne semblant pas s'améliorer avec le temps (et / ou le contexte devenant plus difficile à capter). De plus, les études périodiques (en particulier annuelles) ne peuvent se permettre d'afficher de fortes différences de consommation entre deux exercices, sous peine de semer le doute sur la validité des exercices antérieurs. Les résultats des études périodiques sont donc très lissés.

15. *International Energy Outlook*. Washington, D.C. : Energy Information Agency, rapport annuel.

16. Pays de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) et en transition (Europe de l'Est et ex-URSS).

17. L'erreur moyenne sur la consommation est de 690 Mtep pour les pays industrialisés et de - 360 Mtep pour les pays en développement, soit 330 Mtep au niveau mondial.

D'après Brian O'Neill et Mausami Desai¹⁸, un changement de modèle de prévision ne suffit pas à améliorer la qualité des travaux (les hypothèses sur les variables étant aussi très influentes sur les résultats). Les mêmes auteurs précisent que la nature du pays étudié n'a pas d'impact (il n'y a pas de « pays à erreur ») et qu'il n'y a pas non plus de « série temporelle à erreur », c'est-à-dire qu'un organisme peut très bien réaliser une étude très juste une année donnée, puis faire beaucoup d'erreurs l'année suivante, et *vice versa*. D'une façon générale, les analyses de prévision sont pour eux toujours des échecs car elles n'intègrent pas les événements de rupture, comme les chocs pétroliers ou la mise en place de politiques de maîtrise de la demande en énergie. Ils pointent également une inertie dans la prise en compte des changements et la lenteur des chargés d'études à intégrer de nouvelles informations. Ils jugent également, et ils ne sont pas les seuls¹⁹, que les études de long terme sont dominées par la prolongation des tendances passées, même si une tentative de prise en compte des incertitudes est matérialisée par l'étude de variantes (généralement *a minima* selon trois hypothèses : basse, médiane, haute).

Pourquoi se trompe-t-on ?

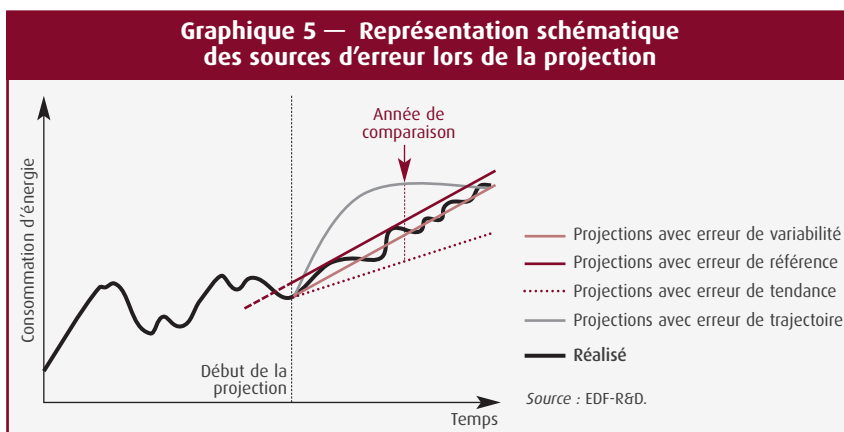
Brian O'Neill et Mausami Desai décomposent l'erreur observée entre réalisé et projeté en trois concepts (graphique 5) : la nature de la référence choisie, la tendance générale (hausse, baisse) et la variabilité (variation inter-annuelle indépendante de la tendance) ; auxquels nous pouvons rajouter l'erreur de trajectoire. Le choix de la référence a peu d'influence sur l'erreur. La tendance a, elle, une forte influence à long terme, mais peu à court terme. La variabilité est plus importante pour le court terme mais peut être considérée comme une erreur irréductible de la projection.

Les causes d'erreur sont nombreuses et tiennent d'abord à la complexité de la modélisation de la demande en énergie. Celle-ci intègre des déterminants propres au monde énergétique (prix des énergies, efficacité des équipements, rigueur du climat), mais également des déterminants de contexte ou des variables d'activité comme la démographie, la croissance économique. Ces derniers peuvent avoir les impacts quantitatifs les plus importants. Il convient donc d'identifier si les causes d'erreur viennent d'une mauvaise expertise énergétique ou d'une mauvaise appréciation du contexte. Dans ce dernier cas, c'est la fragilité de la réflexion globale sur les données de contexte qu'il y a lieu de questionner.

Nous ne consommons pas l'énergie pour elle-même mais pour les services qu'elle nous rend. Les déterminants de cette consommation dépendent donc des types de services désirés et consommés. Ils sont nombreux, de

18. O'NEILL Brian C., DESAI Mausami. « Accuracy of Past Projections of US Energy Consumption ». *Energy Policy*, vol. 33, n° 8, 2005, pp. 979-993.

19. GRANGER Clive W.J., JEON Yongil. « Long-term Forecasting and Evaluation ». *International Journal of Forecasting*, vol. 23, n° 4, octobre-décembre 2007, pp. 539-551.



natures variées, et de plus, ils ne sont pas indépendants les uns des autres. Ils s'obtiennent par description des services unitaires rendus (fabriquer une tonne d'acier, parcourir un kilomètre, chauffer un mètre carré de bâtiment), donc du secteur de consommation (industrie et agriculture, transports, bâtiments). Ils concernent soit l'efficacité de l'équipement qui rend le service (technique), soit l'intensité d'usage de ce service (comportement individuel, nature de l'environnement dont le climat).

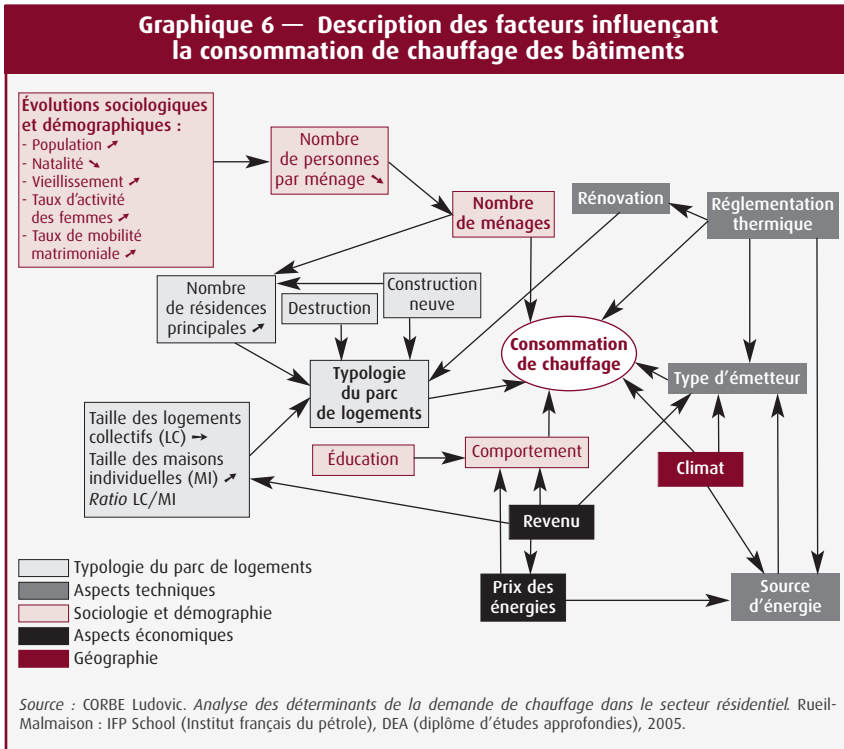
Les variables d'activité rendent compte de la quantité de services à assurer (combien de personnes à transporter, combien de tonnes d'acier à produire). Elles sont généralement liées au domaine de la démographie ou de l'économie.

Enfin, les politiques — au sens large ²⁰ — vont avoir un impact sur les déterminants et donc sur les consommations d'énergie. Dans le contexte européen actuel, il est même probable que les quantités et la nature des énergies consommées dans le futur dépendront des politiques énergétiques. Les scénarios de prospective se doivent donc de les intégrer, ce qui est très souvent le cas puisque beaucoup de scénarios sont construits dans le but d'étudier les impacts énergétiques de politiques actuelles et futures.

À titre d'exemple, les déterminants des consommations de chauffage des bâtiments sont décrits dans le graphique 6 (page suivante). Cela correspond à des dizaines de variables, organisées en systèmes complexes. Il est illusoire, même pour un seul secteur de consommation, de les décrire toutes, encore moins de toutes les renseigner et *a fortiori* d'en prévoir les évolutions.

Le choix des quelques variables que l'on va considérer et la capacité à bien les renseigner sont donc cruciaux. À ce titre, il faut insister sur la sous-

20. Pas uniquement les politiques énergétiques : les choix en matière d'urbanisme, par exemple, ont un fort impact à long terme sur les consommations de transport et sur celles des bâtiments.



estimation de l'impact des variables de contexte par rapport aux déterminants plus énergétiques. La plupart des études prospectives comparent des scénarios dont les corps d'hypothèses concernant les variables de contexte sont identiques. Compte tenu du fort impact des hypothèses relatives au PIB, il est cependant fréquent que le jeu de scénarios intègre des variantes illustrant la sensibilité des résultats à différentes évolutions futures du PIB. L'IEO, par exemple, propose chaque année deux variantes (une de croissance économique forte, une autre de croissance économique faible). En revanche, les variables démographiques (population, nombre de ménages, taille des ménages) ou d'urbanisme (zones urbaines, densité, habitats collectifs ou individuels, taille des logements) font rarement l'objet de variantes ou d'études de sensibilité, sauf dans des travaux très récents²¹. Pourtant, leur impact peut être plus important que celui des variables purement énergétiques et une erreur de 10 % sur la population future a souvent plus de conséquences que celles que nous faisons sur des variables de nature plus énergétique (voir encadré ci-contre).

21. Comme l'étude PROMOV (Prospective des modes de vie et société post-carbone), en cours de réalisation en France au sein du CLIP (Club d'ingénierie et prospective) et de l'IDDRI (Institut du développement durable et des relations internationales, Paris).

LA VARIABLE D'ACTIVITÉ « POPULATION »

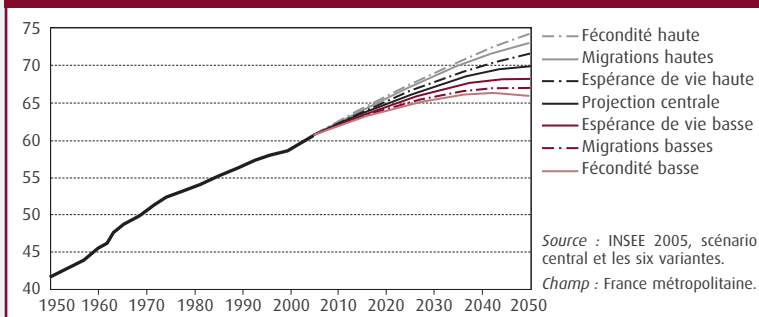
L'évolution de la population est un déterminant de premier plan, surtout dans certains secteurs comme le résidentiel, l'enseignement, les bâtiments de santé, le transport par véhicules légers. Les scénarios de prévisions et de prospective utilisent des données démographiques exogènes généralement basées sur une (seule) projection, dite centrale.

À l'échelle de la France, le graphique ci-dessous permet de constater que près de 10 millions d'habitants séparent

les projections à 2050 de l'INSEE (Institut national de la statistique et des études économiques), soit une variation de plus de 6 % entre la projection centrale et ses extrêmes. Choisir une projection autre que la projection centrale peut avoir un impact plus important sur les consommations d'énergie, qu'une variation de 10 % sur un déterminant plus énergétique tel que le rendement des systèmes de chauffage.

M.-H.L. et alii

Évolutions de la population selon le scénario central et les six variantes retenues par l'INSEE (en millions d'habitants)



Une fois identifiées les variables les plus pertinentes ou les plus accessibles, celles-ci renseignent un modèle de consommation dont la nature a un impact certain sur les résultats.

Le modèle utilisé pour quantifier les consommations d'énergie

Les modèles de demande en énergie sont de natures très variées et ont fait l'objet de nombreuses tentatives de recensement et de classement, disponibles dans une abondante littérature ²². Pour faire bref et au risque de

22. Voir SWAN Lukas G., UGURSAL Ismet V. « Modeling of End-use Energy Consumption in the Residential Sector: A Review of Modeling Techniques ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 8, 2009, pp. 1819-1835 ; et CRASSOUS Renaud. *Modéliser le long terme dans un monde de second rang. Application aux politiques climatiques*. Paris : CIREN (Centre international de recherche sur l'environnement et le développement) et Institut des sciences et industries du vivant et de l'environnement (AgroParisTech), 2008 (thèse), 345 p.

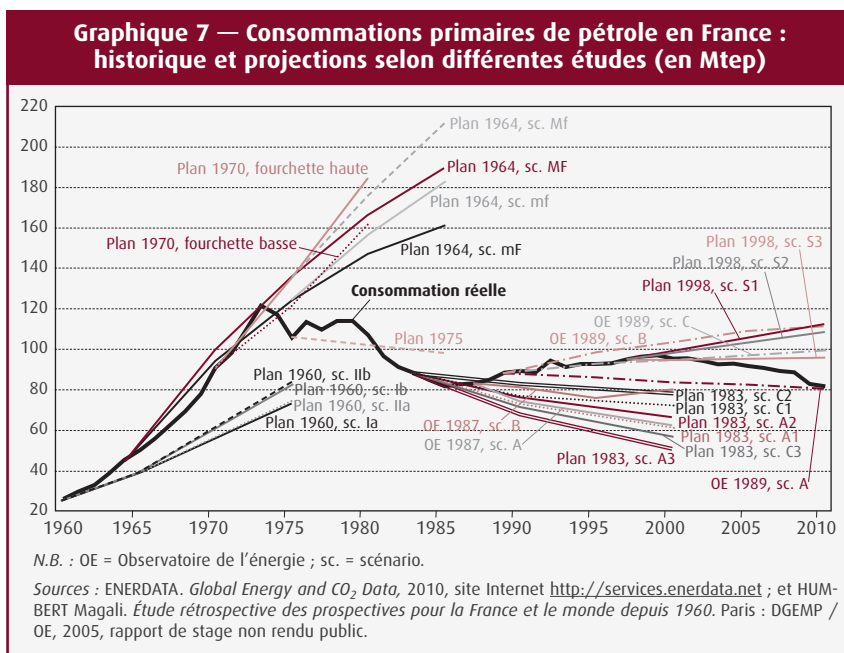
paraître simplistes aux yeux des spécialistes, nous ne distinguerons que deux catégories de modèles de consommation d'énergie, selon qu'ils essaient de décrire des relations de cause à effet entre déterminants et consommations (modèles « déterministes ») ou qu'ils mettent en œuvre des corrélations observées entre des variables — généralement macroscopiques — et les consommations d'énergies (modèles « empiriques »).

Les modèles empiriques de demande énergétique sont basés sur l'observation des tendances passées. Les consommations d'énergie sont le plus souvent (en tout cas dans les modèles actuels) mises en corrélation avec des grandeurs macroscopiques à l'aide de modèles statistiques. Dans l'état actuel des connaissances, ce sont des variables économiques (croissance du PIB, prix des énergies) qui synthétisent le mieux toutes les dimensions à prendre en compte (modèles économétriques). Ce type de modèle est bien adapté à des secteurs de consommation sur lesquels on dispose de peu d'informations concernant les déterminants directs de la consommation d'énergie, ou à des zones géographiques vastes dont la diversité rend difficile une description détaillée. Les phénomènes décrits sont globaux, ce qui fait que ce type de modèle entre dans la catégorie *top-down*, c'est-à-dire une modélisation descendante, partant de grandeurs macroscopiques et exogènes au monde de l'énergie pour descendre vers les consommations d'énergie. Les modèles descendants sont surtout utilisés dans des études de prévision.

Les modèles déterministes nécessitent une description physique relativement fine des caractéristiques de parcs d'équipements (véhicules, procédés industriels) et des infrastructures (lignes de chemin de fer, bâtis des logements) permettant de rendre des services énergétiques. Ils peuvent donc être lourds à renseigner. Les relations entre les variables décrites et les consommations sont explicites. Ce type de modèle est plus adapté à des secteurs de consommation bien renseignés ou de petite taille (monosectoriels). La vision d'ensemble du secteur de consommation s'obtient par agrégation des consommations de chaque unité du parc décrit, ce qui explique que ces modèles appartiennent à la famille dite ascendante (*bottom-up* en anglais, mais également appelés modèles agrégatifs), modèles qui ont l'ambition d'être déterministes.

Ces deux familles de modèles ne répondent pas aux mêmes questions : les premiers sont plutôt adaptés pour quantifier l'impact de variables macroéconomiques (quels impacts de l'évolution du prix des énergies ?), et les seconds plus à même de décrire les impacts d'actions techniques (par exemple, l'impact potentiel d'un changement de procédé dans la fabrication de l'acier).

Il convient de vérifier que les conclusions d'une étude prospective basée sur une approche macroéconomique n'aboutissent pas à des impossibilités techniques (utilisation d'une ressource au-delà de ses réserves prouvées) ou organisationnelles (tous les ménages installent des doubles-vitrages la même année, puis plus rien pendant 30 ans). De même, des conclusions basées sur un modèle *bottom-up* très technique qui aboutiraient à des situations économiques jamais observées doivent *a minima* être argumentées (par



exemple, plus de rénovations annuelles pour atteindre le facteur 4²³ que la filière bâtiment ne peut en assurer actuellement).

Les situations décrites étant complexes, aucune des deux approches n'est suffisante et les modèles actuellement les plus prometteurs sont des modèles hybrides ou *a minima* intégrant des limitations empêchant les résultats d'aboutir à des impossibilités physiques ou économiques.

Quel que soit le modèle utilisé, la première qualité d'un scénario restera la cohérence globale des hypothèses sur lesquelles il est bâti. Dans tous les cas, les conclusions ne devront pas être extrapolées au-delà du domaine de validité du scénario, c'est-à-dire celui de ses hypothèses.

La projection dans le temps pose des problèmes spécifiques

Élaborer des hypothèses pour le futur pose problème. Quelle méthodologie adopter quand le travail disciplinaire est basé sur l'observation, comme dans le cas des sciences économiques ou sociales ? (on ne peut, par définition, observer le futur). Tout chercheur redoute de se faire accuser du pontif qui rapproche la prospective de la boule de cristal. Cela incite à produire des résultats raisonnables et justifiables. Ce qui ne favorise pas la capacité

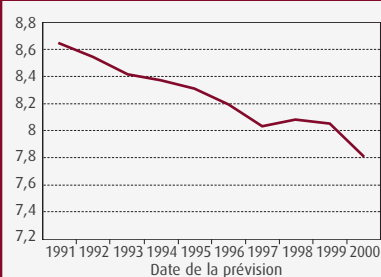
23. Objectif de réduction des émissions de CO₂ de 75 % en 2050 par rapport à 1990.

à s'extraire du contexte actuel lors de l'élaboration des hypothèses futures d'un scénario, cela pouvant provoquer un déficit d'imagination.

Le contexte présent influençant la nature d'un scénario, la date à laquelle ce dernier a été élaboré est importante. Pour le monde énergétique, 1973, date du premier choc pétrolier est un repère incontournable. Il y a un « avant » et un « après » 1973 dans les scénarios de prospective énergétique.

Savoir si un scénario date d'avant ou après le premier choc pétrolier est utile (ne serait-ce que parce que les statistiques énergétiques ne se sont vraiment structurées qu'après cette date).

Graphique 8 — Prévisions du volume de population mondiale (en milliards d'habitants) en 2025 selon la date de prévision

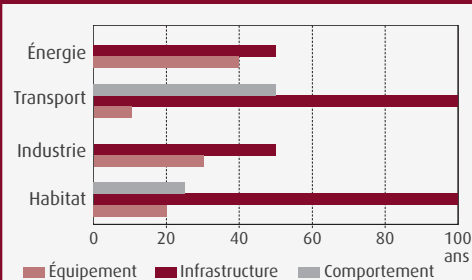


Source : INED (Institut national d'études démographiques). *Prévisions de Population Reference Bureau*. Paris : service Documentation de l'INED, 2002.

Une analyse menée sur les études concernant la France et le monde ²⁴ aboutit, entre autres, à des conclusions différentes sur la prise en compte du premier et du second choc pétrolier. Si les projections ont sous-estimé l'impact du premier choc, c'est l'inverse qui s'est produit pour le second, surtout en France avec une très forte sous-évaluation des consommations d'énergie qui ont suivi (voir graphique 7).

La distance entre la date d'élaboration de l'étude et l'horizon de projection joue également un rôle, comme en témoigne le graphique 8, emprunté aux études démographiques.

Graphique 9 — Temporalités du modèle VLEEM (Very Long Term Energy Environment Model) par secteur et type de variable



Source : ENERDATA. *Seminar on Human Development and Sustainability of Energy Systems*. Paris : ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), 30 avril 2003.

À court terme, les inerties des structures de consommation d'énergie empêchent généralement d'envisager des différences sensibles entre scénarios. Compte tenu des faibles vitesses de renouvellement des infrastructures et équipements de la demande en énergie (graphique 9), les technologies émergentes à la date d'élaboration du scénario n'auront pas eu le temps d'être développées ou de se déployer suffisamment pour

24. HUMBERT Magali. *Étude rétrospective des prospectives pour la France et le monde depuis 1960*. Paris : DGEMP / OE, 2005, rapport de stage non rendu public.

peser sur la consommation à 20 ans. C'est la raison pour laquelle les études à horizon lointain permettent d'imaginer plus facilement des scénarios alternatifs et conduisent à des résultats plus contrastés que les études de court terme. *A contrario*, les changements de comportements, les crises politiques ou économiques, peuvent induire des variations rapides de la demande mais sont rarement pris en compte dans les études prospectives, qui n'intègrent généralement pas de rupture non prévue.

Le caractère plus ou moins conservateur du scénario sur le plan technique est également sensible : s'autorise-t-on uniquement l'emploi de technologies déjà disponibles (« sur étagère ») ou introduit-on de nouvelles techniques ? Si oui : quand, avec quelle efficacité et quels coûts ? Lorsque l'on introduit de nouvelles technologies, il est difficile de prédire leur succès et leurs performances. Il est pourtant frappant de constater le contraste entre la timidité des hypothèses d'évolution des performances et des coûts des technologies de la demande énergétique, d'une part, et les hypothèses de ruptures fortes faites sur les nouvelles technologies de l'offre, d'autre part. Les sources lumineuses de type LED (diodes électroluminescentes) ont par exemple beaucoup plus rapidement pénétré le marché que prévu, alors que les coûts du photovoltaïque ou de l'éolien ne baissent pas aussi vite qu'annoncé.

Il y a des domaines pour lesquels il reste très difficile d'étayer des hypothèses futures. Sur le plan des variables, on citera les évolutions de la croissance économique et la nature de ses relations avec la consommation d'énergie. Les erreurs sur le PIB et les prix du pétrole futurs sont largement citées par les auteurs des études. Concernant les secteurs, c'est celui de l'industrie (premier secteur de consommation mondiale) dont l'avenir est le plus complexe à imaginer. D'une part, son dynamisme est fortement lié à celui de l'activité économique et les erreurs sur la projection du PIB ont alors un fort impact. D'autre part, dans des pays déjà développés, la difficulté tient à la localisation géographique des futures usines, en particulier lorsque le périmètre géographique de l'étude se limite à l'Europe. *A contrario*, les secteurs ayant une forte inertie comme le résidentiel sont plus déconnectés de l'activité économique et souffrent moins des erreurs commises sur le PIB.

Par ailleurs, l'évolution des comportements des consommateurs d'énergie et des acteurs de la filière énergétique (au sens large : chaîne de distributeurs, maintenance, etc.) est probablement l'aspect le plus difficile à prendre en compte dans un scénario. Nous savons par exemple que les gisements d'économies d'énergie liés au comportement sont importants et peuvent être activés très rapidement²⁵ (même si nous ne savons pas comment...). La plupart des scénarios basés sur des modèles économiques intègrent un effet « prix des énergies » (donc prix du service énergétique rendu) ayant un impact sur l'intensité avec laquelle les consommateurs usent du

25. BINET Guillaume. *Energy Savings through Behavior: How Far Can We Go?* Papier soumis (mais non publié) dans le cadre de la BECC (Behavior, Energy and Climate Change Conference) des 15-18 novembre 2009 (Washington, D.C.).

service étudié. En revanche, la plupart des projections réalisées sur des bases techniques sont dites « à comportement constant » et n'intègrent ni effet prix ni effet rebond ²⁶.

À l'échelle mondiale, c'est l'évolution des comportements de consommation des pays en développement qui est le facteur d'incertitude majeur. Ces derniers ne suivront pas forcément les modes de développement occidentaux, comme le montrent les évolutions pour l'instant différentes des régimes alimentaires en Inde et en Chine.

Enfin, on constate très souvent que la référence annonce des consommations supérieures à celles réalisées *in fine*. Cela peut s'expliquer par le fait que la référence est souvent une prolongation des tendances d'un passé qui n'était pas encore contraint en énergie, ou du moins que les auteurs des études sont lents à prendre conscience de ces nouvelles contraintes. Certaines projections, comme celles du Department of Energy des États-Unis, sont réputées pour les fortes valeurs de leurs scénarios, en particulier pour la référence. Nous sommes dans un monde imprégné par la croissance et une référence ne peut qu'être fortement croissante, c'est presque un problème de sémantique. Il est par exemple très généralement admis qu'une forte croissance démographique et une forte décroissance économique sont incompatibles, *a minima* dans les pays riches. Mais depuis plusieurs années, les études prenant en compte la contrainte sur la ressource énergétique, y compris pour la référence, sont de plus en plus nombreuses. On constate que des scénarios mondiaux comme le WEO ²⁷ affirment « que la tendance n'est pas soutenable », à tel point qu'en 2010, l'AIE a utilisé comme scénario de référence un scénario dit de « nouvelles politiques » qui anticipe la mise en œuvre des politiques envisagées par les gouvernements.

Mais d'une façon générale, l'impact des futures politiques énergétiques, en particulier de maîtrise de la demande énergétique, qui tendent à réduire les consommations, est rarement bien pris en compte dans les scénarios, induisant *de facto* une surestimation des consommations futures. Il y aurait là une source d'erreur intrinsèque dans les études qui prédisent un tendanciel non souhaitable et préconisent des politiques énergétiques d'économie d'énergie. Ces dernières étant mises en place, elles induisent une boucle de rétroaction de type « effet Bison futé ²⁸ » et produisent une autodestruction du scénario de référence, mais, à l'inverse, elles rapprochent les scénarios alternatifs envisagés du réalisé par un phénomène d'autoréalisation.

En revanche, si les études sont faites dans un but d'investissement productif, les investissements supplémentaires sont effectivement réalisés,

26. CPUC (California Public Utilities Commission). *Energy Efficiency Policy Manual Version 2*. San Francisco : CPUC, 2003.

27. *World Energy Outlook*. Paris : AIE / OCDE, rapport annuel.

28. Cela renvoie aux prévisions de trafic routier, au moment des départs en vacances, du dispositif « Bison futé » : un effet parfois constaté est l'absence de bouchons aux heures auxquelles ils étaient annoncés, les automobilistes ayant décalé leur départ suite à la prévision.

relaxant la contrainte sur l'offre et permettant à la consommation de rester plus élevée en réalité que celle prévue dans des scénarios alternatifs (dans ce cas, c'est la référence qui s'autoréalise et les scénarios alternatifs qui s'auto-détruisent). Ce phénomène est souligné par H. Linderoth qui note que la surestimation de la demande est jugée comme potentiellement moins grave (autrement dit comme une simple désoptimisation du système énergétique) qu'une sous-estimation des consommations avec une demande inattendue (correspondant potentiellement à une rupture de l'équilibre offre-demande).

Scénarios normatifs ou réalistes ?

Toutes les projections sont simplificatrices et ne peuvent prétendre représenter pleinement la réalité, il suffit pour cela de comparer l'évolution passée (chahutée) d'une variable ou d'un résultat et celle (très régulière) de sa projection (voir graphique 2, *supra*). C'est ce que nous avons décrit plus haut sous le terme d'erreur due à l'absence de prise en compte de la variabilité.

Une source d'erreur importante est l'assimilation de la norme à la réalité. Depuis le premier choc pétrolier, des réglementations ont commencé à imposer des performances minimales pour les équipements énergétiques. Ces obligations s'expriment par des normes comme celles utilisées pour caractériser la consommation des véhicules, et mesurées selon un protocole précis (normes UTAC ²⁹) ou l'étiquette énergie des équipements et des bâtiments. En France, la RT (Réglementation thermique) et le DPE (Diagnostic performance énergie) sont des repères permettant de quantifier la performance que doit respecter un bâtiment neuf ou celle d'un bâtiment existant, avant ou après rénovation.

Mais la norme peut être éloignée de la réalité pour des raisons de comportement des utilisateurs, qui sont très hétérogènes et différents en moyenne de celui choisi pour le calcul normé (par exemple, une conduite plus ou moins énergivore de son véhicule) ou de défaillance technique (par exemple, une isolation thermique mal posée dans un logement, une réglementation non respectée). Il convient donc d'apprécier la nature normative ou plus réaliste d'un scénario et, surtout, de s'assurer que cette nature reste homogène tout au long du déroulement de l'étude. Une étude qui mélangerait les deux modes (comme partir des consommations de chauffage réelles actuelles et leur appliquer des gestes de rénovation normatifs calculés à partir du DPE) ne pourrait donner des résultats exploitables.

Les acteurs de l'étude : auteurs, commanditaires et destinataires

Il faut probablement distinguer les publications scientifiques, universitaires, destinées par exemple à améliorer un modèle de consommation, et

29. Union technique de l'automobile, du motorcycle et du cycle.

les études réalisées pour (ou par) des entreprises ou des institutionnels (ministères, agences de l'énergie, organisations non gouvernementales).

Dans le premier cas, la culture scientifique des auteurs influence les méthodes et le modèle choisi (avec les limites que nous avons déjà évoquées) et le caractère réalisable des scénarios construits n'est pas toujours bien pris en compte. Les groupements d'auteurs pluridisciplinaires sont encore rares mais constituent probablement une bonne garantie de la cohérence des travaux.

Dans le second cas, les études prospectives sont le plus souvent réalisées pour un public cible, elles illustrent un discours ou confortent un message. *A minima*, les auteurs ont des contraintes à respecter. La signature est donc importante : est-ce un acteur de l'offre énergétique ou un acteur de la demande ? Un groupe de travail multiacteurs permet d'éviter des scénarios trop orientés. Mais à l'inverse, si le nombre d'acteurs est trop important, le consensus sera étroit et les scénarios politiquement incorrects écartés (comme ceux ayant pour hypothèse une faible croissance économique dans certaines zones géographiques).

Dans tous les cas, la transparence des hypothèses prises pour bâtir les scénarios est une garantie du sérieux de l'étude et permet au lecteur de se faire une opinion moins dépendante de celle des auteurs et, *a minima*, de bien percevoir le domaine de pertinence de l'étude.

On se trompe, et alors ?

Force est de constater que cette analyse reste incomplète et frustrante faute de vraies études rétrospectives (utilisant les modèles avec les hypothèses contextuelles qui se sont réellement produites). Ces dernières permettraient pourtant de mieux comprendre les mécanismes de la consommation d'énergie.

En attendant, et bien que de nombreuses sources d'erreur aient été mises en évidence, il y a déjà beaucoup d'enseignements à retirer des scénarios d'une étude prospective, à condition de garder un esprit critique.

Le premier d'entre eux est la vision en dynamique de nos systèmes de consommation d'énergie qui permet de comprendre les moteurs de leurs évolutions. La simple prolongation des tendances peut obliger à prendre des décisions dès maintenant pour éviter des irréversibilités ou des situations non souhaitables. Depuis le célèbre rapport *Halte à la croissance* ?³⁰, tout le monde sait à quoi peut servir une étude prospective.

L'exercice est également très formateur pour les auteurs car il permet, au-delà des résultats, de tirer des enseignements sur les structures de consom-

30. MEADOWS Dennis et Donella, BEHRENS William, RANGER Jørgen. *The Limits to Growth*. New York : Universe Books, 1972 (traduction française *Halte à la croissance* ? Paris : Fayard, 1973).

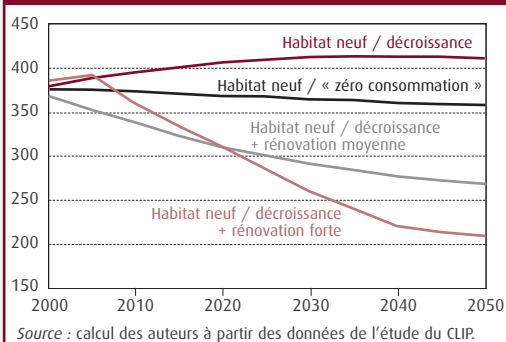
TIRER LES ENSEIGNEMENTS D'UNE HYPOTHÈSE PEU PROBABLE

Des hypothèses très peu crédibles peuvent déboucher sur des conclusions irréfutables dans le cadre d'une étude prospective. Les résultats ci-dessous sont inspirés d'une étude du

CLIP (Club d'ingénierie et de prospective) de 2001¹ : si les bâtiments neufs construits entre 2005 et 2050 ne consommaient aucune énergie de chauffage (courbe noire), l'impact sur

les consommations de chauffage du parc de logements en 2050 ne serait qu'une baisse minimale par rapport à 2005. Ce type de projection permet de prouver que la performance des futurs logements neufs ne suffira pas à réduire fortement les consommations de chauffage, et qu'elle devra être complétée par une rénovation volontariste des logements existants.

Scénarios de consommation de chauffage des résidences principales françaises entre 2005 et 2050 (en TWh/an)



M.-H.L. et alii

1. TRAISNEL Jean-Pierre (sous la dir. de). « Habitat et développement durable. Bilan rétrospectif et prospectif ». *Cahiers du CLIP*, n° 13, 2001, pp. 5-72.

mation d'énergie des secteurs étudiés. Prendre conscience que certains secteurs de consommation développent plus d'inertie que ceux de la production d'énergie est souvent source d'étonnement, mais permet de hiérarchiser les actions et d'identifier les secteurs qui doivent agir tôt car avançant lentement. Enfin, les enseignements des études rétroactives (*backcasting*) permettent de tracer les fameuses « feuilles de route » (*roadmap*³¹ en anglais³²) et de recommander une chronologie cohérente des programmes à lancer.

Même si les scénarios ne sont pas toujours très réalistes, leur analyse peut conduire à des conclusions très robustes comme un point commun à tous les résultats de scénarios très contrastés : la probabilité que cet invariant se retrouve dans le futur devient alors forte.

31. Une *roadmap* est, selon Robert Galvin (ancien directeur de Motorola), « une vision élargie de l'avenir d'un domaine de recherche choisi, fondée sur le savoir collectif et l'imagination des clefs de changement les plus éclairantes » (traduction Futuribles).

32. DAIM Tugrul U., OLIVER Terry. « Implementing Technology Roadmap Process in the Energy Services Sector: A Case Study of a Government Agency ». *Technological Forecasting & Social Change*, vol. 75, n° 5, juin 2008, pp. 687-720.

Écrire un scénario de prospective, c'est d'abord raconter une histoire. La qualité de l'histoire vient avant tout de sa cohérence, loin devant la pertinence de la valeur absolue des résultats chiffrés. Les auteurs doivent donc faire preuve de modestie (quelle est la valeur de mon histoire ?) et de transparence (ai-je bien livré les hypothèses les plus sensibles ?). Quant au lecteur, il lui faut tirer les enseignements de ces études en étant à même d'apprécier leur robustesse. Notre conclusion sera donc synthétique : transparence et modestie pour les auteurs, esprit critique pour les lecteurs.

Les énergies renouvelables : jusqu'où ?

PAR CÉDRIC PHILIBERT ¹

Voici un peu plus de cinq ans, en janvier 2006, Futuribles consacrait un gros numéro spécial aux perspectives énergétiques et à l'effet de serre (n° 315). L'heure était déjà à l'inquiétude et plusieurs articles analysaient les sombres perspectives d'évolution des ressources énergétiques et la problématique du changement climatique. Cette même année 2006, de l'avis de certains experts, le peak oil aurait été atteint : la production de pétrole aurait atteint son apogée et devrait stagner avant de décliner (plus ou moins rapidement). Celle de gaz devrait elle aussi plafonner, vers 2025-2030, ainsi que Jean Laherrère l'a montré dans ces colonnes en avril dernier (n° 373).

Dans ce contexte et compte tenu des efforts incontestables à faire pour limiter le réchauffement climatique, il est devenu indispensable, d'une part de faire en sorte de maîtriser la demande d'énergie, et d'autre part de miser sur d'autres sources de production énergétique, cette deuxième option étant sans doute plus facile à mettre en œuvre que la baisse des consommations. Les énergies renouvelables ont donc, sans conteste, un rôle essentiel à jouer, à l'avenir, dans la diversification du mix énergétique et son orientation dans le sens du développement durable. Cédric Philibert, spécialiste de ces énergies au sein de l'AIE, nous en présente ici le potentiel et la place qu'elles pourraient occuper dans les années à venir.

Après une présentation des scénarios de l'AIE aux horizons 2035 et 2050 (qui montrent la nécessité de politiques volontaristes pour promouvoir les énergies renouvelables), il souligne les deux voies majeures dans ce secteur : l'éolien et le solaire. Puis l'auteur s'inté-

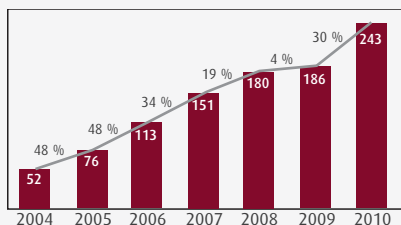
1. Chercheur à la division Énergies renouvelables de l'Agence internationale de l'énergie (AIE, Paris).

resse ensuite à ce que l'on entend par « renouvelable » : ces énergies sont-elles 100 % renouvelables ou faut-il compléter l'offre, stocker la ressource, etc. ? Il analyse la place que les énergies renouvelables pourraient prendre dans les bâtiments et les secteurs de l'industrie et du transport, et selon quelles modalités techniques. Enfin, Cédric Philibert examine les aspects économiques : quels coûts pour quels bénéfices ? Il montre en substance que l'investissement de départ est certes important (en particulier pour les pouvoirs publics, en termes de mesures incitatives), mais qu'à long terme, le jeu en vaut la chandelle, « le déploiement massif des énergies renouvelables appara[issant] aujourd'hui comme la clef » pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux et à la lutte contre le changement climatique. S.D. ■

Après une stagnation en 2009, conséquence de la crise financière, les investissements dans les énergies alternatives ont repris leur marche en avant dans le monde, atteignant en 2010 le montant substantiel de 243 milliards de dollars US (graphique 1). Le solaire photovoltaïque, qui connaît depuis 10 ans une croissance au rythme annuel de 30 %, a pulvérisé son propre record

en 2010, dépassant 100 % de croissance. Et l'on se prend à rêver : les renouvelables offrent-elles une alternative crédible aux énergies fossiles, largement dominantes dans le mix énergétique mondial, et au nucléaire ? Jusqu'où peuvent-elles aller dans un monde semble-t-il toujours plus assoiffé d'énergie ? Nous verrons le rôle que leur prête l'Agence internationale de l'énergie (AIE) aux horizons 2035 et 2050 ; nous verrons s'il est possible d'aller plus vite et surtout plus loin dans leur développement ; enfin nous discuterons les questions de coûts et bénéfices du déploiement à grande échelle des énergies renouvelables.

Graphique 1 — Investissements dans les énergies alternatives (en milliards de dollars US), 2004-2010



N.B. : ces chiffres incluent la R&D publique et privée, et les petites capacités distribuées. Ils ont été ajustés pour tenir compte des réinvestissements et n'incluent pas les produits issus de transactions d'acquisition.

Source : Bloomberg New Energy Finance.

Les scénarios de l'AIE

Pouvons-nous véritablement compter sur les renouvelables pour réduire les risques nucléaires et maîtriser les changements climatiques ? Pour l'AIE, la réponse est oui, incontestablement². La proportion d'énergies renouvelables

2. Voir AIE. *World Energy Outlook 2010*. Paris : AIE / OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), novembre 2010.

dans les trois grands domaines que sont l'électricité, la chaleur et les transports, augmente considérablement dans tous les scénarios mondiaux qu'elle brosse à l'horizon 2035.

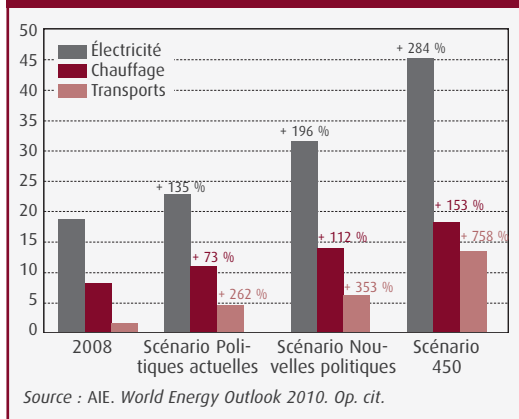
Dans le scénario « Politiques actuelles » (*Current Policy Scenario*, CPS), la production d'électricité d'origine renouvelable grimpe par exemple de 18 % aujourd'hui à 23 % en 2035 en pourcentage de la production électrique totale ; du fait de la croissance des consommations, elle fait plus que doubler en valeur absolue. Dans le scénario « Politiques nouvelles » (*New Policy Scenario*, NPS), qui correspond en gros aux engagements pris lors des deux dernières conférences des Nations unies sur les changements climatiques à Copenhague (fin 2009) et Cancún (fin 2010), les renouvelables triplent leur production d'électricité (leur contribution passant à 30 %) et doublent leur production de chaleur ; la production de biocarburants pour les transports quadruple. Enfin, dans le scénario « 450 » — pour 450 parties par million en volume (ppmV) de CO₂ dans l'atmosphère, concentration réputée limiter le réchauffement planétaire aux alentours de 2 °C —, la part des renouvelables dans la production d'électricité atteint 45 % (un quadruplement en volume), 18 % dans la production de chaleur et 14 % dans la production de carburants pour le transport.

Si les renouvelables sont en croissance dans tous les cas, l'écart entre les

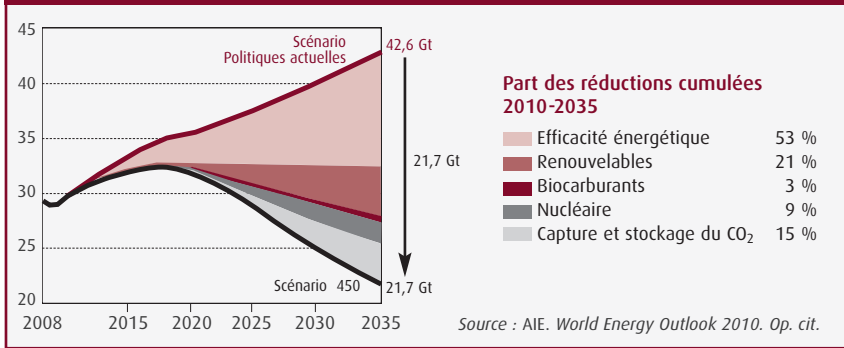
scénarios reste considérable — une autre façon de dire que rien n'est acquis si l'on s'en tient aux politiques actuelles. Regardons de plus près ce qui sépare le scénario « Politiques actuelles » du scénario « 450 », le plus « amical » pour le climat. Les émissions de CO₂ d'origine énergétique sont représentées sur le graphique 3 (page suivante). Elles passent de 30 milliards de tonnes (Gt) par an aujourd'hui à plus de 42 Gt en 2035 si rien n'est fait, ou descendent à moins de 22 Gt dans le scénario « 450 ».

La première source de réduction d'émissions, c'est l'efficacité énergétique, autrement dit les économies d'énergie, pour plus de la moitié du total. En deuxième figurent les renouvelables qui, biocarburants inclus, comptent pour un quart des réductions totales. Suivent la capture et le stockage du CO₂ dans les grandes installations de combustion — industrielles ou de production d'électricité —, enfin le nucléaire. L'efficacité, les renouvelables et le nucléaire comptabi-

Graphique 2 — Croissance des renouvelables dans les scénarios de l'AIE à l'horizon 2035 (en %)



Graphique 3 — Les émissions mondiales de CO₂ (énergie) dans les scénarios « Politiques actuelles » et « 450 » (en Gt)



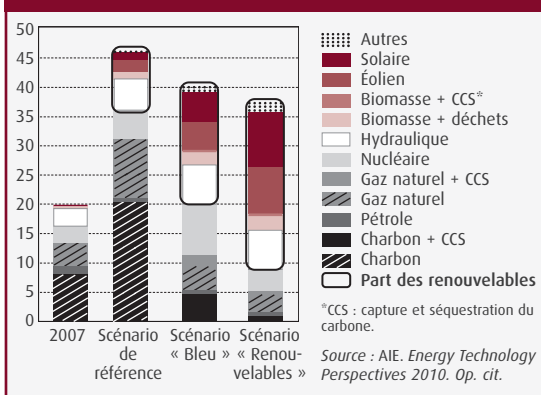
lisés ici s'ajoutent aux progrès d'efficacité, aux renouvelables et au nucléaire déjà inclus dans le scénario « Politiques actuelles » — mais il est vrai que ces scénarios ont été élaborés avant la catastrophe survenue à Fukushima en mars 2011.

Peut-on faire plus avec les renouvelables ? Oui répond encore l'AIE, dans une autre série de scénarios portant l'horizon temporel à 2050³, et notamment son scénario « Renouvelables » (*BLUE Map High*

Ren). Dans ce scénario, la part des énergies renouvelables grimpe à 75 % dans la production mondiale d'électricité, au prix d'un surcoût de 10 % de l'électricité par rapport au scénario « Bleu » (*BLUE Map*), celui qui divise par deux en 2050 — au moindre coût — les émissions mondiales de CO₂ d'origine énergétique, compatible avec la stabilisation des concentrations atmosphériques vers 450 ppm.

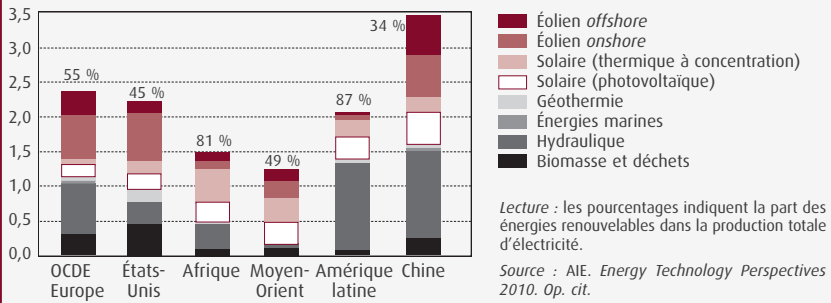
De quelles énergies renouvelables s'agit-il ? Le graphique 4 permet de comparer le mix électrique actuel (2007), celui de 2050 à politiques inchangées et enfin celui des scénarios « Bleu » et « Renouvelables ». Ce dernier emploie moins de nucléaire et de charbon, et beaucoup plus d'énergies éoliennes et solaires, portées plus haut que l'hydraulique, aujourd'hui de loin la première source d'électricité renouvelable. Le mix varie

Graphique 4 — Part des renouvelables dans les scénarios de l'AIE à l'horizon 2050

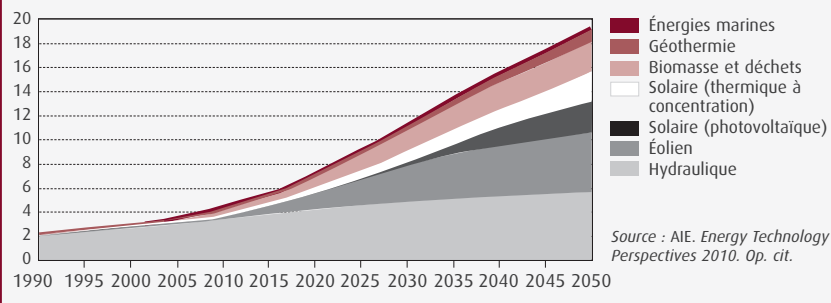


3. AIE. Energy Technology Perspectives 2010. Paris : AIE / OCDE, juillet 2010.

Graphique 5 — Le mix de renouvelables dans les grandes régions du monde en 2050, scénario « Bleu » (en millions de GWh)



Graphique 6 — Croissance des renouvelables pour la production d'électricité dans le scénario « Bleu » (en millions de GWh)



selon les régions du monde en fonction des ressources disponibles, comme le montre le graphique 5 illustrant le scénario « Bleu » : beaucoup de solaire en Afrique et au Proche-Orient, avec une majorité de solaire thermodynamique à concentration, une domination hydraulique en Amérique latine, un mix d'éolien et de solaire aux États-Unis, beaucoup d'éolien et d'hydraulique en Europe et en Chine...

L'éolien et le solaire en premières lignes

Toutes les énergies renouvelables électriques sont en croissance dans ce scénario, y compris l'énergie hy-

draulique (graphique 6). Si le potentiel restant à exploiter est faible dans les pays industriels, il reste très important dans de nombreux pays émergents. La biomasse accroît également sa contribution, bien qu'elle soit également sollicitée — nous y reviendrons — pour la génération de chaleur et la production de biocarburants. Les énergies marines restent marginales, la géothermie à peine moins. La croissance de l'éolien est spectaculaire — il est vrai que seuls le Danemark, l'Espagne, l'Allemagne lui ont déjà donné un rôle significatif, même si le nombre de machines est également important en Chine, en Inde et aux États-Unis, et les coûts désormais proches de la com-

LES TECHNIQUES SOLAIRES

Les modules photovoltaïques transforment directement la lumière en courant continu, utilisant l'énergie des photons pour mettre des électrons en mouvement. Ils sont principalement à base de silicium mono ou polycristallin, découpés dans des lingots. La technique des films minces, à base de silicium ou d'autres semi-conducteurs comme l'arséniure de gallium, réduit le coût de l'électricité mais aussi le rendement, elle demande donc davantage de surface.

Le solaire thermodynamique transforme d'abord la lumière en chaleur, puis celle-ci en électricité. Pour disposer de bons rendements, il faut concentrer la lumière solaire. On utilise soit des concentrateurs linéaires, notamment les miroirs cylindro-paraboliques, soit des concentrateurs ponctuels, notamment les tours solaires, ce qui permet d'atteindre des températures et des rendements plus élevés. Le stockage de la chaleur dans des mélanges de sels fondus permet de dissocier complètement la collection de la chaleur de la génération d'électricité, afin d'y procéder de préférence aux heures de pointe de la demande, voire en continu jour et nuit.

Enfin, n'oublions pas le chauffage solaire, surtout rentable pour la production d'eau chaude, qui fournit aujourd'hui quatre fois plus d'énergie que l'électricité solaire, dont la moitié en Chine.

C.P.

pétitivité. Celle du solaire l'est plus encore — mais il est vrai qu'on part de très bas, avec 40 000 mégawatts installés dans le monde, alors qu'il s'agit de produire en 2050 près d'un quart de l'électricité mondiale, soit avec le photovoltaïque (PV) qui transforme directement la lumière en électricité, soit avec le solaire thermodynamique qui recueille l'énergie solaire sous forme de chaleur bientôt transformée en énergie mécanique, puis en électricité. Dans le scénario « Renouvelables », ce sont encore l'éolien et le solaire qui fournissent l'essentiel du surcroît d'électricité renouvelable nécessaire pour arriver à 75 % — leurs potentiels sont moins bornés que celui de la biomasse, dû à sa faible productivité à l'hectare, ou celui de l'hydraulique.

Solaire PV et thermodynamique sont assez différents — et complémentaires. Le premier peut être développé en assemblages de toutes

tailles, depuis quelques centimètres carrés sur une montre jusqu'à plusieurs hectares dans une grande centrale au sol. Son domaine de prédilection sera toutefois l'enveloppe des bâtiments existants ou à construire, principalement les toits, également les façades ou les surfaces voisines (ombrières de parking, par exemple), dans les secteurs résidentiel et commercial. Techniquement, les surfaces disponibles permettraient de couvrir de 15 % des besoins au Japon à 55 % aux États-Unis (le Nouveau Monde est bien plus ensoleillé que l'Ancien). Là, sur les lieux mêmes de consommation, le PV entre en compétition avec l'électricité distribuée par le réseau, dont le prix au détail est plus élevé que le prix en gros de l'électricité, aux bornes des centrales à charbon, à gaz ou nucléaires.

Par ailleurs, le PV utilise toute lumière, qu'elle soit directe quand

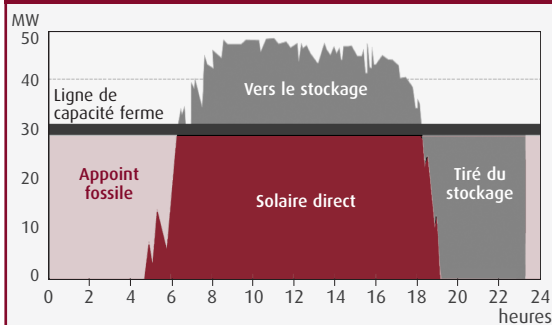
le soleil est en vue, ou diffuse quand il se cache derrière les nuages. Le solaire thermodynamique, lui, n'utilise aujourd'hui que la lumière directe qu'il concentre par des miroirs sur de petites surfaces absorbantes afin d'atteindre des températures de plusieurs centaines de degrés, et son domaine d'élection est plutôt la centrale de dizaines ou centaines de mégawatts en régions semi-arides : l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient, l'Afrique du Sud, l'Inde, l'Australie, le sud-ouest des États-Unis, le Mexique, le nord du Chili, le Tibet, le Xinjiang et peut-être la Mongolie intérieure, le Rajasthan et le Gujarat en Inde...

Une autre différence importante tient aux manières de gérer la variabilité de la ressource. Stocker l'électricité coûte cher aujourd'hui, bien plus que stocker de la chaleur. Le PV, jusqu'à produire 10 % environ de l'électricité totale, utilisera surtout le réseau comme stockage, lui envoyant aux heures les plus ensoleillées tout excédent local de production et s'appuyant sur lui pour compenser les déficits. Il y a souvent une assez bonne coïncidence entre l'ensoleillement et la consommation d'électricité, mais elle est loin d'être totale. Dans de nombreux pays en développement, la demande est plus forte au coucher du soleil car elle reste tirée par l'éclairage ; dans les pays tempérés à froids, la demande est plus forte en hiver qu'en été. Les centrales thermodynamiques, en stockant la chaleur solaire

avant de produire l'électricité, dissocient l'une de l'autre, ce qui permet de faire mieux coïncider — sur un rythme quotidien — la production avec les pointes de demande, ce qui augmente beaucoup la valeur de l'électricité solaire. Elles peuvent également être « hybridées » avec un appoint fossile — voire servir d'économiseur de combustible sur une centrale aujourd'hui fossile. À plus long terme, il deviendra intéressant de produire de l'électricité solaire jour et nuit, une option dont la centrale solaire à tour Gemasolar en Espagne devrait dès cet été démontrer la faisabilité commerciale — la démonstration technique fut faite aux États-Unis voici déjà 12 ans avec Solar Two, après que les autorités françaises avaient sans réfléchir arrêté la centrale Thémis dans les Pyrénées.

Les deux formes d'électricité solaire nécessiteront que les réseaux d'électricité évoluent vers plus de flexibilité et d'intelligence pour gérer la variabilité du photovoltaïque (et surtout celle de l'éolien), avec de nouvelles longues lignes de transport en courant continu, limitant

Graphique 7 — Principe de fonctionnement d'une centrale solaire jour et nuit avec stockage thermique et appoint fossile



Source : GEYER Michael, 2007, in AIE. *Technology Roadmap: Concentrating Solar Power*. Paris : AIE / OCDE, mai 2010.

perles et emprises, et traversant les mers pour apporter l'électricité solaire thermodynamique vers de plus nombreux consommateurs, en plus des grandes villes que sont Valence, Casablanca, Alger, Tunis, Tripoli, Alexandrie, Le Caire, Khartoum, San Diego, Los Angeles et bien d'autres.

À échéance 2020 voire 2030, la gestion de la variabilité des renouvelables sur les réseaux s'avère moins problématique qu'on ne le prétend trop souvent. D'abord, parce que si chaque éolienne peut voir sa puissance tomber à zéro, de multiples éoliennes dispersées sur les territoires ne s'arrêtent pratiquement jamais toutes ensemble. Ensuite et surtout, les réseaux gèrent déjà aujourd'hui une variabilité importante, celle de la demande, grâce à la souplesse de nombreux moyens de production, à la gestion de la demande (par exemple, le stockage de l'eau chaude chez les usagers, encouragé par les tarifs jour / nuit), à l'interconnexion, enfin aux capacités de stockage à coût abordable, notamment dans les stations de transfert d'énergie par pompage (hydraulique). L'ouvrage de l'AIE *Harnessing Variable Renewables* paru au printemps ⁴ montre qu'il est possible d'utiliser mieux encore la souplesse disponible ou de l'augmenter sans qu'il soit bientôt nécessaire de recourir à des options de stockage d'électricité plus coûteuses.

Néanmoins, mieux vaut aujourd'hui combiner les deux formes d'électricité solaire pour mettre à profit des gestionnaires de réseau

le stockage peu coûteux de l'électricité thermodynamique. C'est plus simple en Amérique du Nord qu'en Europe, où le potentiel endogène se limite à l'extrême sud du continent. Desertec, Transgreen et le plan solaire méditerranéen sont nés de ce constat — l'Afrique du Nord dispose de telles ressources qu'elle peut sans difficulté alimenter ses populations et ses industries avec de l'électricité solaire, et en exporter des quantités importantes vers l'Europe, ce qui devrait l'aider à financer cet essor. Les promoteurs de Desertec se sont fixé comme objectif une contribution à hauteur de 15 % de l'approvisionnement électrique de l'Europe — une limite plus politique que technique, car rien, sinon la peur d'une nouvelle dépendance, n'empêcherait l'Europe d'importer davantage.

Une énergie 100 % renouvelable ?

Un certain nombre de scénarios visent à démontrer la faisabilité soit d'une électricité entièrement renouvelable, soit — objectif autrement ambitieux — d'une énergie entièrement renouvelable ! Ces scénarios prennent parfois des partis diamétralement opposés en ce qui concerne la biomasse : pour certains, comme le scénario WWF ⁵, elle est l'énergie de bouclage, celle supposée disponible pratiquement sans limites, qui supplée tous les manques, aussi bien dans la génération d'électricité que dans la production de chaleur ou de carburant.

4. Paris : AIE / OCDE, mai 2011.

5. *The Energy Report: 100% Renewable Energy by 2050*. Gland (Suisse) : WWF (World Wide Fund for Nature), 2011.

LE PROJET DESERTEC

Le transfert de grandes quantités d'énergie solaire entre les zones arides bien ensoleillées d'Afrique du Nord et les concentrations humaines d'Europe, a d'abord été proposé par le gouvernement algérien lors de l'adhésion au programme « SolarPACES » de l'Agence internationale de l'énergie. Promue ensuite par la fondation Desertec, l'idée a inspiré deux initiatives majeures en Europe, le Plan solaire méditerranéen (PSM) et l'initiative industrielle Desertec (DII). Le PSM projette d'amener 20 gigawatts d'électricité renouvelable à l'Union européenne depuis les pays du sud de la Méditerranée. DII regroupe près d'une vingtaine d'entreprises majeures, et vise à fournir un cadre pour les investissements permettant de contribuer fortement aux besoins énergétiques d'Afrique du Nord et du Proche-Orient, et de fournir à l'Europe, en 2050, jusqu'à 15 % de son électricité.

L'énergie solaire abondante de l'Afrique du Nord et du Proche-Orient permet de produire de l'électricité à un coût moindre qu'en Europe, compensant les coûts du transport de l'électricité. Les coûts de production d'une électricité ferme et flexible en Afrique du Nord, à 150 euros le mégawattheure, et son transport vers l'Europe, entre 15 et 45 euros le mégawattheure, en feraient un moyen séduisant d'atteindre les objectifs actuels et futurs de l'Union européenne en matière de renouvelables.

Pour les pays exportateurs, il n'y a pas d'opposition entre exporter vers l'Europe et fournir à la population et à l'économie locales l'électricité dont elles ont besoin, car le potentiel d'électricité solaire est pratiquement illimité. À l'inverse, les exportations peuvent aider à garantir le financement des centrales solaires thermodynamiques sur la rive sud de la Méditerranée, qui généreraient donc de l'électricité à la fois pour l'export et pour les besoins locaux. La condition première pour les investissements nécessaires est que les pays européens offrent de signer des contrats d'achat à long terme.

Certains se sont inquiétés de risques pour la sécurité énergétique des pays importateurs. Les exportations seraient possibles grâce à une vingtaine de lignes HVDC (*High Voltage Direct Current*, courant continu haute tension) de cinq gigawatts chacune, venant de pays différents et empruntant des itinéraires différents. Si certaines se trouvaient hors d'usage pour une raison technique, ou par suite d'une attaque ou d'un sabotage, d'autres seraient toujours opérationnelles et pourraient prendre le relais. En tout cas, les électriciens travaillent généralement avec des réserves de capacité qui pourraient intervenir s'il était nécessaire. En revanche, contrairement à ce qui se passe avec le pétrole ou le gaz, les pertes de revenus pour les exportateurs seraient définitives, l'électricité ne pouvant être stockée durablement. Les pays exportateurs, plus encore que les importateurs, auraient donc tout intérêt à éviter toute interruption de fourniture.

Le consortium Medgrid s'intéresse lui principalement à l'installation des lignes HVDC nécessaires à ce transfert. Cette technologie est déjà couramment utilisée pour les transports à longue distance, notamment depuis les grands barrages. Elle réduit les pertes électriques dans le transport, emprunte des lignes aériennes dont l'emprise au sol est quatre fois moindre. Les lignes peuvent aussi emprunter des tunnels existants et surtout être posées sous les mers, ce que l'on ne peut pas faire avec le courant alternatif. Le courant est reconverti en courant alternatif avant d'être distribué.

C.P.

D'autres, comme M.Z. Jacobson et M.A. Delucchi⁶, la rejettent presque entièrement parce que sa combustion est source de pollution atmosphérique au même titre que celle des carburants fossiles — hors effet de serre.

On s'en tiendra à une approche équilibrée : la biomasse, peu coûteuse en investissement et facile à stocker, constitue aujourd'hui une source importante d'énergie primaire (plus de 10 %), trop souvent utilisée avec une faible efficacité. L'utilisation des déchets végétaux et animaux permet de produire de l'énergie sans épuiser les sols ni compromettre l'alimentation ; les cultures proprement énergétiques peuvent entrer dans ce tableau mais ne sauraient s'étendre sans limites. Les scénarios de l'AIE mentionnés ci-dessus font appel à des quantités croissantes de bioénergie sur l'hypothèse de procédés avancés, notamment pour les biocarburants. Il n'en est pas moins vrai que la photosynthèse offre des rendements limités dans la transformation de l'énergie solaire en énergies utilisables, au moins un ordre de grandeur inférieur à ceux des techniques solaires directes, et ce sont donc celles-ci plutôt que celle-là qui doivent progressivement prendre de l'importance pour que la sécurité énergétique ne devienne pas une menace pour la sécurité alimentaire du monde.

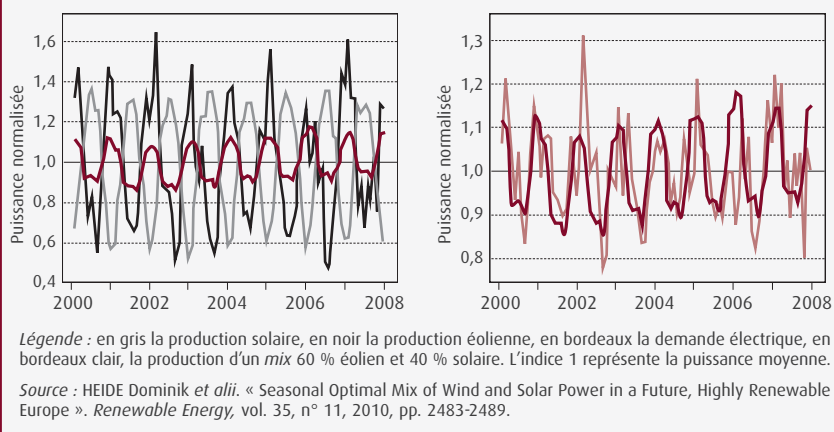
Donc, d'abord l'électricité. Pour aller au-delà des 75 % du scénario « Renouvelables », quelles sont les

ressources disponibles, sachant que dans les scénarios les plus réductions d'énergie fossile et de gaz à effet de serre, la consommation d'électricité diminue à peine (par rapport aux autres scénarios ; elle augmente par rapport à maintenant), les améliorations de l'efficacité étant annulées par le développement de nouveaux usages pour la chaleur résidentielle, tertiaire et industrielle, et les transports ? L'hydraulique rencontre assez vite des limites topographiques, tout comme la géothermie, à moins d'un développement massif de la géothermie dite avancée, qui repose, un peu comme l'exploitation des gaz de schiste, sur la fracturation des roches du sous-sol. Les énergies marines sont prometteuses mais on ne connaît encore pas grand-chose de leurs coûts et disponibilité réels. Restent donc essentiellement l'éolien et le solaire, toujours et encore, dont le potentiel technique est plusieurs fois supérieur à la demande.

Leur déploiement à grande échelle fait ressortir *in fine* des besoins de stockage : l'interconnexion et la gestion de la demande atténuent la variabilité, mais la flexibilité des centrales à combustible disparaîtrait avec elles. Reste à souligner la complémentarité du vent et du soleil sur une base saisonnière : la ressource éolienne est plus importante en hiver, la ressource solaire plus importante en été, le *mix* idéal variant en fonction du moment des pointes annuelles de demande, en hiver en moyenne sur l'Europe, en été aux États-Unis, au Proche-Orient,

6. JACOBSON Mark Z. et DELUCCHI Mark A. « Providing All Global Energy with Wind, Water, and Solar Power. Part I: Technologies, Energy Resources, Quantities and Areas of Infrastructure, and Materials; Part II: Reliability, System and Transmission Costs, and Policies ». *Energy Policy*, vol. 39, 2011, pp. 1154-1190.

Graphique 8 — Variations saisonnières comparées de la demande d'électricité en Europe et de la production d'un mix éolien (60 %) et solaire (40 %)



en Australie... (voir graphique 8). Sur un rythme quotidien, le PV est plus prévisible que l'éolien et colle mieux à la pointe, le solaire thermodynamique a son propre stockage. Les besoins de stockage sont donc plus grands en Europe, où l'éolien prédominera. Avec un fort taux de pénétration des renouvelables variables, il faut pouvoir stocker les kilowattheures excédentaires aux périodes de forte production et faible consommation, et les utiliser quand la consommation est forte et la production faible.

Une partie de la solution pourrait être apportée par les batteries des véhicules électriques. Il faut bien sûr privilégier leur recharge lorsque la production éolienne ou solaire sera excédentaire par rapport aux autres besoins du réseau, voire obtenir qu'une fraction des batteries en recharge — on estime que 90 % des véhicules sont à l'arrêt à tout moment — puissent servir de tampon aux fluctuations des énergies renouvelables « variables ». On peut y parvenir avec une ges-

tion fine et en temps réel des réseaux pour que les propriétaires soient dédommagés pour l'utilisation de leur batterie aux fins de gestion du réseau. Les choses pourraient être simplifiées si les batteries sont louées aux automobilistes selon le modèle proposé par le prestataire de services pour véhicules électriques Better Place, qui permet par ailleurs des changements rapides de batterie dans des stations robotisées, seul moyen de donner à la voiture tout électrique une autonomie sans limites.

Les batteries constituent un moyen de stockage onéreux, justifié en relèvement de carburants liquides, moins en relèvement de charbon ou de nucléaire. Pour des stockages centralisés, on se tournera vers les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP), dont l'efficacité aller-retour est nettement meilleure, autour de 80 %, et qui constituent une solution éprouvée, avec plus de 100 GW de capacité électrique dans le monde, soit 99 % du stockage de l'électricité.

Tout d'abord, les stations existantes doivent être rééquipées de pompes à vitesse variable pour mieux suivre la production éolienne, et ce peut être l'occasion d'accentuer leur vocation de stockage quotidien en augmentant leur puissance et le nombre de cycles, à tailles de réservoirs inchangées. Par ailleurs, le potentiel ne se limite pas nécessairement aux endroits où deux réservoirs, en partie naturels, d'altitudes différentes sont proches l'un de l'autre. Il est parfois possible de créer un réservoir inférieur supplémentaire à proximité d'un barrage réservoir existant, éventuellement en souterrain.

Une autre option consiste à développer les stations en bord de mer, utilisant celle-ci comme réservoir inférieur, sur le modèle de la STEP d'Okinawa au Japon. François Lempérière a étudié cette option en détail⁷ et montré que la Haute-Normandie, en particulier, pouvait accueillir plusieurs projets de ce type. Une autre option démontrée est le stockage en sous-sol d'air comprimé — il y a quelques installations de ce type, notamment aux États-Unis et en Allemagne. Pour récupérer l'énergie stockée, on y brûle du gaz naturel, mais il semble possible de s'affranchir largement de cette contrainte en stockant séparément la chaleur dégagée lors de la compression de l'air — celle qui vous brûle les doigts quand vous regonflez les pneus de votre vélo — et en la restituant au moment voulu.

Cependant, couvrir intégralement des périodes prolongées, assez rares, de faible production renouvelable

conduit à créer des capacités de stockage peu sollicitées, donc finalement très coûteuses. Cela ne serait pas nécessaire si l'on conserve des centrales à gaz très flexibles, peu coûteuses, qu'on sollicitera peu et qui fourniraient tout au plus 10 % de l'électricité annuelle. Plutôt que chercher à tout prix à évincer totalement les fossiles dans la production électrique, mieux vaut sans doute s'employer à en réduire autant que possible la part dans leurs emplois directs, dans le bâtiment, l'industrie et les transports.

Les bâtiments, l'industrie et les transports

Si une production largement renouvelable de l'électricité apparaît faisable, les choses sont un peu plus compliquées si l'on s'intéresse à l'énergie totale : remplacer les combustibles fossiles employés, en sus de la production d'électricité, dans les bâtiments, l'industrie et les transports, apparaît une tâche plus ardue que se passer de nucléaire. Pour une large part, nous l'avons vu, la solution réside dans une poursuite de l'électrification déjà au cœur des scénarios « amicaux pour le climat » de l'AIE, en substituant aux com-



La STEP d'Okinawa (Japon) - D.R.

7. LEMPÉRIÈRE François. *Quelles options réalistes pour l'électricité future en France ?* Paris : Hydrocoop, avril 2010 (site Internet www.hydrocoop.org).

bustibles des utilisations efficaces de l'électricité, notamment des pompes à chaleur dans l'habitat et l'industrie, divers procédés dans l'industrie comme l'induction, les fours à arc électrique ou autres, et dans les transports, les véhicules électriques et les hybrides rechargeables, dotés comme tous les hybrides de moteurs électriques et d'un moteur thermique leur donnant une autonomie illimitée, mais aussi de batteries suffisantes pour effectuer les trajets quotidiens en se rechargeant sur le réseau.

Les pompes à chaleur, du reste, sont efficaces parce qu'elles transfèrent dans les bâtiments ou l'industrie de la chaleur ambiante dans l'air, les eaux ou les sols, d'origine solaire et peut-être géothermique, fournissant pour chaque kilowattheure électrique consommé plusieurs kilowattheures thermiques (au moins 2,85 pour être reconnues comme énergie renouvelable en Europe aujourd'hui). La chaleur des capteurs solaires est vite économique pour une bonne fraction de l'eau chaude sanitaire — et la Chine utilise les deux tiers des 280 millions de mètres carrés de capteurs solaires thermiques installés dans le monde à cet effet. Il est moins facile de couvrir économiquement une large part des besoins de chauffage, hors réseaux de chaleur urbaine avec stockage saisonnier, encore que le couplage de systèmes dimensionnés au plus juste avec des pompes à chaleur paraisse prometteur.

La géothermie à basse température, la biomasse et la chaleur so-

laire directe peuvent contribuer bien plus qu'aujourd'hui à répondre aux besoins de chaleur dans l'habitat — que l'on peut par ailleurs très fortement réduire. La réglementation thermique des bâtiments, en avance sur les directives européennes, principal acquis du Grenelle de l'environnement⁸ ayant survécu jusqu'ici, règle la question des bâtiments neufs mais pas celle du stock, considérablement plus important dans nos vieux pays froids. La vitesse de pénétration des renouvelables dans le *mix* énergétique total dépendra *in fine* largement du rythme de rénovation de l'habitat existant.

Dans l'industrie, les choses sont un peu plus compliquées. Les fossiles ne fournissent pas seulement de l'énergie mais souvent également des matières premières, ou simplement du carbone, par exemple dans la production du ciment. Le solaire peut, là encore, apporter une contribution, surtout pour les vastes besoins de chaleur à basse ou moyenne température — lavages nombreux, par exemple, dans les industries agroalimentaires ou textiles. Il va fréquemment rencontrer la concurrence des pompes à chaleur qui permettront souvent de récupérer des effluents à température plus basse encore. En fait, la biomasse est l'énergie renouvelable de prédilection dans l'industrie, déjà très utilisée pour d'évidentes raisons de proximité dans les industries du bois et du papier. Le ciment et l'acier ne sont pas techniquement hors de portée, comme le montrent l'exemple

8. Processus participatif lancé en 2007 en France, visant à prendre des décisions de long terme en matière d'environnement et de développement durable, ayant notamment débouché sur deux séries de lois (Grenelle I en juin 2009, et Grenelle II en juillet 2010) (NDLR).

brésilien et l'émergence historique de la métallurgie bien avant l'exploitation du charbon !

L'exemple brésilien n'est probablement pas généralisable à tous cependant, faute de matière première, mais les pays les plus gourmands (la Chine, qui produit plus de la moitié du ciment dans le monde) pourront s'alimenter en partie des ressources immenses de l'Afrique et de l'Amérique latine.

Dans les zones d'ensoleillement direct important, il est possible de produire de la chaleur à tous niveaux de température en concentrant les rayons du soleil, que ce soit pour cuire les aliments, obtenir de la vapeur ou pour divers procédés industriels. En Californie, on est en train de construire une tour solaire pour faciliter la récupération assistée du pétrole. À Denver, on développe un procédé pour gazéifier la biomasse à 1 300 °C dans une tour solaire. De ce gaz on peut faire toutes sortes de carburants liquides pour le secteur des transports, y compris du *jet fuel*. De même pourrait-on utiliser l'énergie solaire pour fabriquer des biocombustibles solides pour la sidérurgie et la fabrication du ciment, voire pour d'autres usages industriels à haute température situés hors des zones les mieux ensoleillées. Il s'agit là d'améliorer l'efficacité dans l'utilisation de la biomasse, dont un bon tiers semble-t-il est aujourd'hui consommé à des fins énergétiques dans les processus de transformation visant à produire des combustibles plus faciles à manipuler et transporter, en substituant du solaire direct à ce tiers-là.

Le secteur des transports apparaît particulièrement difficile à ali-

menter principalement en énergies renouvelables. Des systèmes embarqués solaires et éoliens (voiles ou cerfs-volants automatisés) peuvent jouer un rôle d'appoint significatif dans les transports maritimes, mais les voitures ou avions 100 % solaires resteront des exploits remarquables sans portée directe. Dans les scénarios ambitieux de l'AIE, un quart des carburants serait fourni par la biomasse et nous venons de dire comment, sur la base de la même production, la combinaison avec le solaire direct pourrait augmenter cette part de moitié, la portant donc jusqu'au tiers. L'électrification complète des véhicules individuels est envisageable à terme, celle des poids lourds beaucoup moins, et pour les distances de moins de 500 kilomètres en tout cas, le passage au rail ou à la voie d'eau semble impraticable. Si les camions hybrides se développent pour économiser l'énergie sur les dessertes finales et en ville, une possibilité surgit pourtant : celle d'électrifier la voie de droite des autoroutes pour permettre aux camions hybrides de rouler en étant continûment alimentés en électricité par induction, ou par des trolleys. Les trajets de 150 à 500 kilomètres de distance cumulant en France plus de la moitié des tonnes-kilomètres transportés, l'impact serait loin d'être négligeable.

Les scénarios qui promettent la substitution totale des renouvelables à toutes les formes fossiles ou nucléaires d'énergie, avec ou sans biomasse, font nécessairement appel à un ensemble de technologies démontrées au laboratoire mais encore très éloignées des marchés, tournant autour de l'hydrogène. Il s'agit moins d'un souci de produc-

tion d'énergie que de questions de stockage et de transports — au double sens de transport de l'énergie et d'utilisation dans le secteur des transports. Il s'agit surtout de concentrer suffisamment des énergies à l'origine diluées pour des utilisations à forte densité énergétique, notamment dans l'industrie et transports.

Cependant, de nombreuses difficultés techniques restent à résoudre. La production d'hydrogène est très souvent envisagée par électrolyse de l'eau à partir d'électricité d'origine renouvelable, néanmoins la combinaison d'électricité et de chaleur solaire, ou l'utilisation de chaleur solaire à haute température dans les régions qui s'y prêtent, par exemple pour fournir l'énergie d'un reformage-vapeur du gaz naturel, coûteraient nettement moins cher. Le transport et l'utilisation de cet hydrogène en mélange avec le gaz naturel jusqu'à 20 % en volume — mais seulement 5 % en contenu énergétique — permet d'injecter un peu plus de solaire dans le *mix* énergétique mais ne répond pas à la demande d'un « tout-renouvelables ».

Il faut envisager d'autres moyens : liquéfaction ou compression de l'hydrogène, ou utilisation de réactions d'oxydoréduction de métaux ou autres éléments légers servant de vecteurs..., et bien sûr combustion de l'hydrogène dans des turbines spécifiques ou des piles à combustibles. Rien de tout cela n'est techniquement impossible, évidemment, mais il est quelque peu hasardeux d'aventurer que ces options seront

économiquement disponibles dans 20 ans et pourront avoir été largement déployées d'ici 40 ans ⁹. En fixant à l'Allemagne des objectifs de production par les renouvelables en 2050 de 80 % pour l'électricité et de 60 % pour l'énergie finale, son *EnergieKonzept* ¹⁰ affiche une ambition élevée mais réaliste, à des coûts abordables.

Coûts et bénéfices

Car il faut bien quand même parler coûts et bénéfices, pour conclure. Ces scénarios bousculent bien des idées reçues sur le solaire et l'éolien. On les perçoit, notamment en France, comme des énergies coûteuses, que leur « intermittence » (variabilité conviendrait mieux) et leurs faibles « facteurs de capacité » — elles produisent entre 1 000 et 3 000 heures par an à un équivalent pleine puissance — empêcheraient de jamais jouer un rôle vraiment significatif. Or elles vont jouer un rôle plus grand encore que l'énergie hydraulique, l'énergie renouvelable la moins chère et la plus flexible, propre à répondre très vite à toute variation de la demande, même si l'« hydraulicité » varie d'année en année selon les pluies.

Sur la longue durée, les prix des énergies fossiles semblent durablement orientés à la hausse, même si l'histoire est riche de fluctuations dans les deux sens. Les énergies hydraulique, éolienne et solaires, thermique ou électrique, sont ou seront compétitives avant longtemps, leur déploiement actuel, porté par divers

9. JACOBSON Mark Z. et DELUCCHI Mark A. *Op. cit.*

10. « Concept énergie » présenté par l'Allemagne en 2010, en vue de mettre fin à la dépendance du pays aux énergies fossiles d'ici 2050 (NDLR).

systèmes incitatifs, conduisant à des baisses de coûts régulières. Le coût du meilleur kilowattheure éolien vient de passer sous la barre des sept centimes d'euro, celui du meilleur kilowattheure solaire est tombé à 20 centimes. Quand on installera des toits photovoltaïques au sud de Rome au prix où on les installe aujourd'hui à Hambourg, leur électricité coûtera aux particuliers moins que celle du réseau. Et si l'Arabie Saoudite a choisi de construire des centrales thermoélectriques solaires, c'est parce qu'elle préfère exporter son pétrole plutôt que le brûler sous un soleil intense.

Le pompage de l'eau, la compression de l'air, sont des options de stockage de l'électricité renouvelable qui ne devraient pas l'empêcher de faire jeu à peu près égal avec l'électricité fossile dans les décennies qui viennent, tout comme le transport d'électricité depuis l'Afrique du Nord. L'hydrogène et la pile à combustibles, voilà qui est moins garanti et qui justifie aujourd'hui de sérieux efforts de recherche et développement, voire de démonstration, mais dont prétendre forcer aujourd'hui ou simplement prédire le déploiement, pourrait ne pas résister à un examen approfondi.

L'éolien et le solaire se développent aujourd'hui, dans la plupart des pays, grâce à des politiques de soutien — notamment des tarifs d'achat fixés pour 15 ou 20 ans, qui permettent aux banques de financer les investissements. Ces politiques sont elles-mêmes généralement financées par une sorte de taxe prélevée sur l'ensemble des consom-

mations d'électricité — en France la CSPE, ou contribution au service public de l'électricité, qui finance aussi la cogénération, la solidarité avec les départements d'outre-mer, les tarifs sociaux. Sans ce soutien, le solaire ou même l'éolien, moins chers, ne pourraient pas se développer. De bons économistes soutiennent que si les émissions de CO₂ avaient un prix suffisant, soit du fait de taxes carbone, soit du fait de systèmes de permis d'émission échangeables, il faudrait s'abstenir de toute aide directe aux renouvelables, pour une meilleure efficacité économique ; c'est là une vision statique de l'efficacité économique, qui néglige les potentiels de réduction des coûts des renouvelables que leur déploiement rapide entraîne¹¹.

Cependant, le coût de déploiement de ces énergies nouvelles est bien visible, alors que les bénéfiques sont masqués et, pour beaucoup, différés. Tout d'abord, les renouvelables réduisent le prix de l'électricité dans les marchés dérégulés — hors contribution spécifique. En effet, c'est à tout moment le coût marginal de fonctionnement du « dernier » moyen de production électrique appelé sur le réseau qui fixe le prix de l'électricité sur les marchés. Or, plus il y aura de renouvelables dans la production d'électricité, moins souvent il sera nécessaire de faire appel aux moyens les plus coûteux, comme on commence à le voir en Allemagne et en Espagne, ou encore en Irlande, où la baisse des prix de marché en 2011 devrait compenser exactement le coût des politiques de soutien.

11. PHILIBERT Cédric. *Interactions of Policies for Renewable Energy and Climate*. Paris : AIE / OCDE, document de travail, mars 2011.

Un autre bénéfice important réside dans la garantie de prix stables pour longtemps, contrairement aux prix des énergies fossiles¹², voire celui de l'énergie nucléaire. En appliquant au *mix* énergétique la théorie des portefeuilles financiers, notre regretté collègue Shimon Awerbuch a montré la valeur de la diversification vers les renouvelables¹³.

Encore qu'il y a là un paradoxe dont il faut tenir compte : la pénétration massive de renouvelables, alliée aux économies d'énergie, réduit la demande adressée aux fossiles et en tire les prix vers le bas, faisant ainsi apparaître les renouvelables comme plus coûteuses.

Un autre bénéfice du déploiement des renouvelables est la possibilité d'accélérer l'accès aux services énergétiques modernes du milliard et demi d'individus qui en sont aujourd'hui privés, alors que c'est bien entendu une dimension décisive

du développement économique et humain.

En définitive, un déploiement massif des énergies renouvelables apparaît aujourd'hui comme la clef d'une réponse aux besoins énergétiques de la population et de l'économie mondiale permettant d'en maîtriser les multiples effets sur l'environnement, et notamment les changements climatiques, comme l'affirme le dernier rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat¹⁴. Son corollaire obligé, rappelons-le, est la recherche permanente de l'efficacité énergétique. Celle-ci donne à celui-là toute sa place, faut-il le souligner, au point qu'un des facteurs déterminants de la place future des renouvelables dans le *mix* énergétique des pays développés pourrait être tout simplement le rythme de la rénovation énergétique de leur parc de bâtiments existants. ■

12. Contrairement à ce qu'ont indiqué certains comptes rendus de presse, repris par de bons esprits négligeant de vérifier à la source, l'AIE n'a nullement affirmé, dans son *World Energy Outlook 2011*, que le pic de production de pétrole aurait été atteint en 2006. C'est la baisse de la demande adressée au pétrole, et non un phénomène de rareté géologique, qui explique que dans les scénarios de réduction des émissions de gaz à effet de serre, la production de pétroles conventionnels, et eux seuls, pourrait ne pas dépasser son niveau de 2006 à l'avenir. La production totale de pétrole augmente jusqu'en 2025 dans tous les scénarios de l'AIE, et la seule production de pétroles conventionnels augmente dans au moins un scénario, ce qui démontre *a contrario* que, du moins pour l'AIE, le pic de production pétrolière n'a pas déjà été dépassé. En revanche, une réduction des prix et de la volatilité des prix des combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz) fait incontestablement partie des bénéfices à attendre du déploiement à grande échelle des énergies renouvelables, dont la motivation première reste cependant la nécessité de combattre les changements climatiques.

13. AWERBUCH Shimon (avec Martin Berger). *Applying Portfolio Theory to EU Electricity Planning and Policy-making*. Paris : AIE / OCDE, document de travail AIE / EET (Direction de l'efficacité énergétique et de la technologie), février 2003.

14. *Special Report on Renewable Energy Sources (SRREN): Summary for Policymakers*. Genève : GIEC, mai 2011. Voir l'encadré page suivante (NDLR).

PREMIERS ENSEIGNEMENTS DU RAPPORT DU GIEC SUR LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

À l'heure où nous bouclions ce numéro de *Futuribles*, le rapport final du GIEC sur les sources d'énergies renouvelables n'avait pas été rendu public mais une synthèse destinée aux décideurs en donnait les grandes lignes¹. Dans cette synthèse, publiée en mai 2011, 120 chercheurs ont comparé 164 scénarios de développement des énergies renouvelables (EnR) dans le monde à l'horizon 2050.

En 2008, environ 13 % de l'offre énergétique mondiale était assurée par cinq énergies renouvelables : la biomasse (10 %), l'hydraulique (2,3 %), l'éolien (0,2 %), le solaire et la géothermie (0,1 % chacun). En excluant les usages traditionnels des EnR (biomasse pour la cuisson, le chauffage...), leur part n'est cependant que de 7 %. Néanmoins, le développement des EnR s'est accéléré au cours des dernières années : elles ont représenté presque la moitié des nouvelles installations électriques dans le monde en 2008-2009. Environ 53 % des capacités mondiales de production d'EnR sont installées dans des pays en développement.

Dans la majorité des scénarios étudiés, en 2050, le rôle des EnR dans la limitation des émissions de gaz à effet de serre serait supérieur à celui du nucléaire et du stockage du carbone. Selon les scénarios, la part des EnR dans le *mix* énergétique mondial est multipliée par un facteur 3 à 20 d'ici 2050. Dans les visions les plus optimistes, 80 % de la consommation mondiale d'énergie seraient assurés par les EnR dans 40 ans, un objectif jugé réalisable par les experts du GIEC. Ce seuil permettrait d'atteindre l'objectif fixé par le GIEC de limitation du réchauffement de la planète à 2 °C à l'horizon 2100.

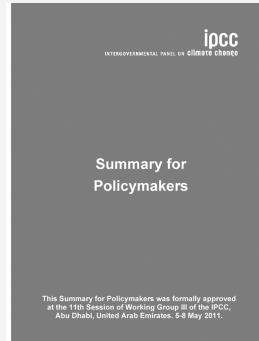
Selon les experts du GIEC, même dans un scénario tendanciel, la part des EnR dans la consommation mondiale d'énergie pourrait doubler d'ici 2030.

Cette croissance des EnR serait facilitée par la poursuite de la baisse des coûts des technologies, grâce aux progrès techniques et aux économies d'échelle. Mais elle supposerait aussi de lever un certain nombre d'obstacles, tels que les subventions toujours importantes aux énergies fossiles ou l'inadaptation des infrastructures (difficulté d'intégration des EnR dans les systèmes énergétiques).

Le coût nécessaire à la réforme des systèmes énergétiques mondiaux est estimé par les experts du GIEC entre 1 400 et 5 100 milliards de dollars US d'ici 2020, puis à un total légèrement plus élevé jusqu'en 2030.

Le prochain rapport d'évaluation du GIEC sur la situation climatique mondiale sera publié en 2014.

Futuribles



1. GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat). *Special Report on Renewable Energy Sources (SRREN): Summary for Policymakers*. Genève : GIEC, mai 2011, 26 p.

L'efficacité énergétique dans le bâtiment en Méditerranée

PAR HENRI-LUC THIBAUT ET EL HABIB EL ANDALOUSSI ¹

En dépit des cris d'alarme lancés depuis 1992 au fil de conférences internationales visant à enrayer le réchauffement climatique et malgré les perspectives d'amenuisement des ressources énergétiques fossiles qui incitent à la modération des consommations énergétiques, peu d'actions ou de mesures incitatives (et encore moins contraignantes) ont été véritablement développées pour agir sur la demande d'énergie. Pourtant, comme le montrent ici Henri-Luc Thibault et El Habib El Andaloussi, certaines mesures très concrètes peuvent avoir des effets majeurs en ce domaine. C'est le cas de tout ce qui touche à l'amélioration de l'efficacité énergétique dans le bâtiment — au sens du logement, de l'habitat et des consommations énergétiques qui y sont liées (chauffage, climatisation, etc.) —, dont les auteurs nous présentent l'impact potentiel dans la région méditerranéenne.

S'appuyant sur les travaux du Plan bleu, qui a élaboré un scénario de rupture dans le domaine de l'énergie pour les pays du Sud et de l'Est méditerranéen (à l'horizon 2030), ceux-ci commencent par rappeler l'importance du bâtiment dans la consommation énergétique régionale et les différents leviers qui pourraient être utilisés pour réduire cette dernière (réglementation, matériaux, efficacité des appareils, etc.). Dans un tel scénario, le potentiel d'économie d'énergie de ce secteur serait considérable ; cela permettrait, en outre, une baisse substantielle des émissions de gaz à effet de serre et aurait aussi des conséquences très positives en termes de créations d'emplois. Les auteurs indiquent enfin les besoins d'investissements,

1. Respectivement directeur du Plan bleu et chargé de mission Énergie au Plan bleu.

selon les pays, sur 20 ans, pour mettre en place les cinq grandes mesures phares d'économie d'énergie, qui pour le coup, seraient de réels investissements d'avenir... S.D. ■

Les pays du Sud et de l'Est méditerranéen (PSEM)² comptent environ 280 millions d'habitants. D'ici 2030 et selon un scénario tendanciel, ces pays verront leurs populations augmenter d'environ 80 millions d'habitants, dont 25 à 30 millions sur les côtes. À un horizon de 20 à 30 ans, c'est donc l'équivalent de 20 villes supplémentaires de plus d'un million d'habitants qui occuperont le littoral méditerranéen. En 2030, plus des trois quarts de la population des PSEM devrait être urbaine.

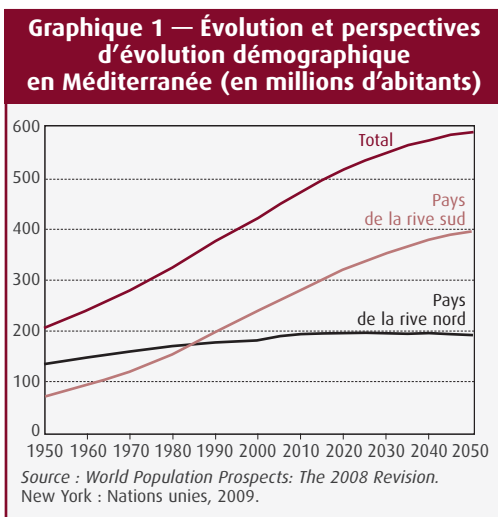
Sous l'effet conjugué de la pression démographique et de la croissance économique, la région méditerranéenne va être soumise à une

forte augmentation de la demande en énergie et en électricité, qui devrait être multipliée par plus de 1,5 d'ici 2030. Cette demande devrait croître quatre à cinq fois plus rapidement dans les PSEM que dans les pays du Nord de la Méditerranée (PNM), jusqu'à représenter en 2030 près de 43 % de la demande d'énergie du Bassin méditerranéen, contre 30 % aujourd'hui (et 47 % de l'électricité contre 28 % actuellement). Ces évolutions se traduiront par des émissions de CO₂ croissantes.

Elles interviendront dans un contexte de changement climatique puisque la région Méditerranée en est d'ores et déjà considérée comme l'un des points chauds. Les PSEM

particulièrement vulnérables devraient notamment connaître une augmentation marquée des températures moyennes, de même qu'une baisse sensible des précipitations.

Aux questions démographiques vont donc être associées de formidables défis pour répondre aux demandes en eau, en énergie et en produits alimentaires d'une population de plus en plus urbaine et concentrée sur le littoral. Elles se traduiront également par un besoin important de construction de nouveaux logements.



2. Le pourtour méditerranéen avec les deux rives, au sud : du Maroc à la Turquie, et au nord : de l'Espagne à Chypre. Voir carte 1.

Un scénario de rupture nécessaire

Au regard de la demande attendue en énergie, le Plan bleu a établi un scénario énergétique alternatif de rupture, fondé sur une amélioration de l'efficacité énergétique et le développement de sources renouvelables, à l'exemple de ceux développés dans le rapport spécial du GIEC publié en mai 2011 sur les sources d'énergie renouvelables et les mesures d'atténuation du changement climatique ³.

Ce scénario alternatif se traduirait par une diminution de la demande unitaire, permettant, en partie du moins, de couvrir les augmentations de la demande globale liées au développement économique et démographique de la région.

À l'heure actuelle, les PSEM comptent pour 30 %, et les PNM pour 70 %, de la consommation d'énergie primaire de la région. Depuis le début des années 1970, le taux moyen annuel de croissance de la consommation d'énergie primaire a été de 5,2 % dans les PSEM (48 à 291 Mtep [millions de tonnes équivalent pétrole] de 1971 à 2007) contre 1,9 % dans les PNM (340 à 665 Mtep de

1971 à 2007). Bien que la part des PSEM dans la consommation totale soit en constante augmentation depuis le début des années 1970, le rattrapage de la consommation par habitant entre les régions nord et sud du bassin se fait plus lentement, le rapport est passé de cinq en 1970 à près de trois actuellement.

L'augmentation progressive du niveau de vie global dans les PSEM devrait se traduire tendanciellement par un rattrapage de la consommation d'énergie des PSEM par rapport aux PNM à l'horizon 2050. Un tel rythme d'évolution de la consommation d'énergie n'est pas soutenable d'un point de vue environnemental, du fait de la raréfaction des ressources fossiles, d'une part, et



3. *Special Report on Renewable Energy Sources (SRREN): Summary for Policymakers*. Genève : GIEC, mai 2011. Voir l'encadré en page 46 de ce numéro (NDLR).

des effets des émissions de gaz à effet de serre et de leurs conséquences sur le climat, d'autre part. Il est donc urgent d'inventer de nouveaux modes de développement et d'aménagement du territoire moins énergivores.

Ceci vaut particulièrement pour le GPL (gaz de pétrole liquéfié) et l'électricité dont la demande est en très forte croissance. Ainsi, selon le scénario du Plan bleu, la demande électrique pourrait doubler voire tripler pour satisfaire les besoins d'éclairage et électroménagers. S'agissant du GPL, une croissance à deux chiffres pourrait être observée dans certains pays (Maroc, Égypte, Turquie) pour des usages de cuisson, de chauffe-eau et de chauffage.

À titre d'illustration, en 2009, plus de 350 000 climatiseurs ont été écoulés sur les marchés marocain et tunisien contre seulement moins de 100 000 avant 2004⁴. L'enquête STEG (Société tunisienne de l'électricité et du gaz) 2004 et le recensement national de 2004 en Tunisie ont, de même, montré que la part du chauffage et de la climatisation est passée de 20,4 % en 1989 à 25,7 % en 2004 dans le bilan des consommations des ménages⁵. Selon le scénario du Plan bleu, les besoins de chauffage / climatisation dans la consommation finale résidentielle des PSEM, passeraient de 30 % actuellement à plus de 60 % à l'horizon 2030.

Premier secteur consommateur d'électricité et second pour les énergies fossiles, le bâtiment constitue donc un secteur à fort enjeu quant au potentiel d'économies d'énergie dans les pays méditerranéens.

Le bâtiment, levier de maîtrise de la demande d'énergie

Environ 450 millions de personnes vivent sur les deux rives de la Méditerranée et consomment chaque année près de 1 000 Mtep d'énergie primaire, soit un peu plus de 8 % de la demande mondiale. Le bâtiment représente le premier secteur consommateur d'électricité et le second — après le transport — pour les énergies fossiles.

Nouveaux logements : un besoin sans précédent

Près de la moitié de la population urbaine méditerranéenne est concentrée dans 3 000 villes de moins de 300 000 habitants. Malgré les progrès enregistrés depuis plus de 20 ans, il existe dans les PSEM de forts déséquilibres entre grandes et petites villes, zones urbaines centrales et périphériques, quartiers favorisés et démunis. Les extensions urbaines se développent souvent sous forme d'habitat informel. L'absence de contrôle réglementaire de ce type de logements,

4. Cf. ADEREE (Agence nationale pour le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique). *Les Éléments techniques du projet de la réglementation thermique du bâtiment au Maroc*. Rabat : ADEREE, 2011.

5. Voir les études nationales réalisées, pour le Plan bleu, par les experts nationaux : Rafik Missaoui (pour la Tunisie), Adel Mourtada (pour le Liban), et Naïm Lahlou et Mohamed Berdai (pour le Maroc) ; disponibles sur le site Internet du Plan bleu, www.planbleu.org.

ÉVOLUTION DES CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE DES MÉNAGES EN TUNISIE ET AU MAROC

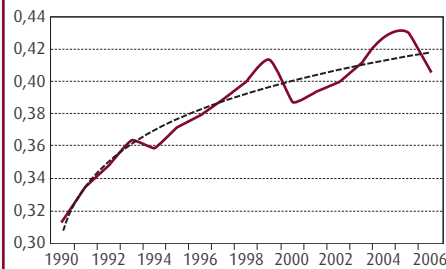
Le Plan bleu a mené des études nationales sur l'efficacité énergétique en Tunisie, au Maroc et au Liban ¹. En Tunisie, par exemple, la consommation unitaire des ménages connaît une tendance à la croissance se justifiant notamment par l'augmentation du niveau de vie des ménages et de leur taux d'équipement en appareils électroménagers. La consommation unitaire est passée de 0,31 tonne équivalent pétrole (tep) par ménage en 1990 à près de 0,41 tep par ménage en 2006, comme le montre le graphique A.

En Europe, la consommation unitaire varie entre 1,1 et 2,3 tep par logement, avec une moyenne de 17 tep par logement et par an. Ramenée au mètre carré, la consommation finale d'énergie en Tunisie est estimée à environ 4,9 kilogrammes équivalent pétrole (kgep) par mètre carré (58 kilowatt-heures par mètre carré) de logement occupé, contre 17 à 20 kgep par mètre carré en Europe. Cette augmentation de la consommation unitaire s'est traduite également par une transformation de la structure de la consommation finale qui a connu le développement de certains usages tels que la réfrigération, le chauffage et la climatisation, comme le montre le graphique B.

Ainsi, la part du chauffage / climatisation est passée de 20,4 % en 1989 à 25,7 % en 2004. L'enquête STEG (Société tunisienne de l'électricité et du gaz) 2004 et le recensement national de 2004, ont permis de dégager les indicateurs de consommations détaillées pour les consommations d'énergie finale et d'électricité, pour le chauffage et la climatisation, par mètre carré de surface de logement chauffé et climatisé (23 kilowatt-heures par mètre carré et par an, soit environ 2 kgep par mètre carré et par an).

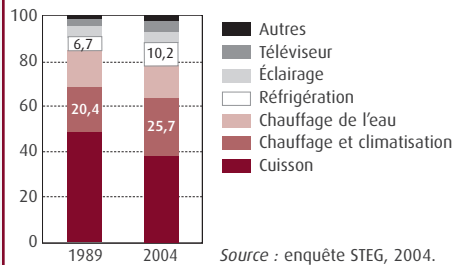
Quant au développement de la climatisation, il constituera un enjeu futur important dans les PSEM en général, compte tenu des évolutions observées ces

Graphique A — Évolution de la consommation finale unitaire d'énergie des ménages en Tunisie (en tep/ménage)



Source : Plan bleu (étude nationale Tunisie).

Graphique B — Structure de la consommation finale d'énergie des ménages selon les usages en Tunisie (en %)



Source : enquête STEG, 2004.

1. Études nationales réalisées pour le Plan bleu par les experts nationaux Rafik Missaoui (pour la Tunisie), Adel Mourtada (pour le Liban), et Naïm Lahlou et Mohamed Berdai (pour le Maroc).

dernières années sur le marché des appareils de climatisation, consécutives à l'amélioration du niveau de vie des ménages et à leur aspiration à des *standards* de confort plus exigeants. Le graphique C, construit à partir des informations collectées de diverses sources, notamment les plus importants distributeurs d'équipements électroménagers sur les marchés marocain et tunisien, illustre cette forte évolution. À titre d'exemple, en 2009, plus de 350 000 climatiseurs ont été écoulés sur les marchés marocain et tunisien contre moins de 100 000 seulement avant 2004.

E.H.E.A

Graphique C — Estimation de l'évolution du marché annuel de la climatisation au Maroc et en Tunisie (en milliers d'unités)



Source : ADEREE (Agence nationale pour le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique).

l'incertitude juridique dans laquelle ils se trouvent et les faibles revenus de la plupart de leurs occupants rendent ce secteur particulièrement imperméable aux mesures d'efficacité énergétique.

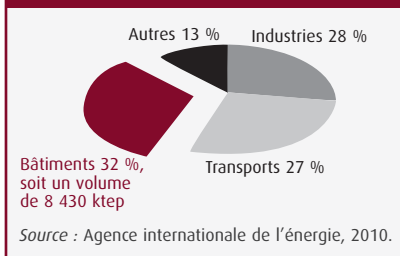
Cette double dynamique — urbanisation et *boom* démographique — va générer un besoin considérable de logements. Selon le Plan bleu,

près de 42 millions de nouveaux logements devraient être construits dans les PSEM d'ici 2030, le total passant de 66 millions en 2007 à près de 108 millions. Cette perspective laisse préfigurer une forte croissance des consommations d'énergie et d'électricité du secteur résidentiel.

Économies d'énergie dans le bâtiment

Au niveau mondial, le secteur du bâtiment représente à lui seul plus de 32 % de la consommation d'énergie finale et contribue à hauteur d'un tiers environ des émissions de CO₂, comme le montre le graphique 2. Au niveau mondial, le potentiel d'économies d'énergie dans le secteur du bâtiment est estimé autour de 40 %⁶, en grande

Graphique 2 — Répartition de la consommation mondiale d'énergie finale par secteurs en 2008



Source : Agence internationale de l'énergie, 2010.

6. Voir MISSAOUI Rafik et MOURTADA Adel. *Case Studies: Instruments and Financial Mechanisms of Energy Efficiency Measures in Building Sector*. Londres / Paris : CME (Conseil mondial de l'énergie) / ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), août 2010.

partie via des mesures économiquement viables selon le scénario « 450 » de l'Agence internationale de l'énergie (2009) ⁷.

Dans les pays du Sud méditerranéen, le bâtiment est responsable de plus d'un tiers de la consommation d'énergie (38 % en moyenne, variant entre 27 % et 65 % dans les PSEM pour l'énergie, et entre 21 % et 51 % pour l'électricité). Agir sur ce secteur constitue donc un levier d'action significatif pour intervenir à la fois sur la demande (mesures d'efficacité énergétique) et sur l'offre (intégration d'énergies renouvelables).

Parmi les divers types de bâtiments existant dans les PSEM, résidentiels, administratifs, commerciaux, le résidentiel représente à lui seul plus de 60 % des émissions de gaz à effet de serre du secteur. Ces tendances ne devraient pas s'infléchir dans les années à venir compte tenu de la croissance attendue de la population de la région et de l'augmentation prévisible du niveau de vie global impliquant un taux d'équipement croissant.

Le secteur résidentiel recèle donc un important potentiel d'économies d'énergie et ceci à des coûts relativement compétitifs. Ainsi, des projets pilotes ⁸ ont montré qu'avec un surcoût de 10 % à 25 % à la construction, jusque 60 % d'économies d'énergie (principalement

liées aux usages de la climatisation et du chauffage) pouvaient être réalisées. Une étude de l'ADEREE au Maroc ⁹, a montré que dans le secteur résidentiel, des surcoûts de l'ordre de 2 % à 8 %, avec une moyenne nationale de 112 dirhams (environ 10 euros) par mètre carré, permettraient de réaliser une réduction des besoins de chauffage et de climatisation de 39 % à 64 % selon la zone climatique considérée. Compte tenu des enjeux et au regard des résultats des projets pilotes, des mesures d'actions réglementaires ou normatives ont progressivement été adoptées par les pays riverains. Toutefois, dans la réalité, le niveau d'application de ces mesures diffère sensiblement d'un pays à un autre (tableau 1, page suivante).

Dans les PSEM, la majorité des bâtiments résidentiels sont encore construits sans isolation thermique (sauf en partie en Israël, en Tunisie et en Turquie). Pour autant, l'isolation thermique des bâtiments est devenue, depuis deux décennies, un élément central des politiques énergétiques gouvernementales.

De même, les barrières au développement d'un marché à grande échelle de la maîtrise de l'énergie dans le secteur du bâtiment restent nombreuses et sont de nature informationnelle, économique, organisationnelle et technique. Ces barrières n'ont rien de spécifique aux

7. Voir AIE. *World Energy Outlook*. Paris : AIE / OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques), 2009. Voir aussi l'article de Cédric Philibert, en page 29 de ce numéro.

8. Voir les projets pilotes étudiés dans le projet MED-ENEC (*Energy Efficiency in the Construction Sector in the Mediterranean*) dans 10 PSEM, site Internet www.med-enec.com/fr/projets-projets-pilotes

9. ADEREE. *Op. cit.*

Tableau 1 — État de la réglementation énergétique dans le secteur résidentiel dans les PSEM

Algérie	Document technique réglementaire (DTR) en 1996 Obligatoire depuis 2000
Égypte	Norme d'isolation thermique obligatoire en 1998 Code d'efficacité énergétique (EE) dans les bâtiments pour résidentiel, obligatoire en 2003 Code d'EE dans les bâtiments pour tertiaire, volontaire en 2005
Israël	Réglementation thermique pour résidentiel en 1986, obligatoire Réglementation thermique pour les bureaux en 1998, obligatoire. Application : bonne <i>Green Buildings Code</i> en 2005 ; mise en œuvre volontaire : application faible
Jordanie	Norme d'isolation thermique en 1990 Code d'EE dans les bâtiments, obligatoire (en cours d'adoption)
Liban	Norme d'isolation thermique en 2005, révisée en 2010
Maroc	Réglementation en cours (cf. Programme national d'EE dans le bâtiment qui vise l'introduction d'un Code énergétique du bâtiment). L'année 2010 a connu le développement des éléments techniques du projet de la réglementation thermique dans le bâtiment dans le résidentiel tertiaire
Syrie	Code d'EE dans les bâtiments, obligatoire en 2008
Tunisie	Réglementation thermique obligatoire pour les bureaux en 2008 Réglementation thermique obligatoire pour le résidentiel collectif en 2009
Turquie	Norme d'isolation thermique en 2000 Norme obligatoire
<i>Source</i> : Plan bleu, Adel Mourtada (Liban) et Rafik Missaoui (Tunisie) ; MED-ENEC.	

PSEM mais sont particulièrement importantes dans leur contexte économique, social et énergétique. Les barrières d'ordre technique sont notamment liées au manque de savoir-faire et de maîtrise des technologies relatives aux mesures d'économie d'énergie par les professionnels du bâtiment, à tous les niveaux. Par ailleurs, l'indisponibilité d'une offre locale crédible de solutions énergétiques et de matériaux nécessaires à leur construction — chauffe-eau solaire, matériaux d'isolation, appareils électroménagers performants, etc. — constitue un frein à la mise en œuvre de tout scénario de maîtrise de l'énergie

dans les bâtiments. De surcroît, l'absence, dans la majorité des pays, de véritable production nationale de matériaux isolants — la brique a de bonnes caractéristiques mais sa conductivité thermique (supérieure à 0,067 watt par mètre carré kelvin¹⁰) ne permet pas de la classer comme un matériau isolant — est un handicap supplémentaire

Rôle du bâtiment dans un scénario de rupture

Le scénario de rupture du Plan bleu prend en compte les économies d'énergie qui pourraient

10. Le W/m².K est l'unité de mesure de la conductivité thermique, unité utilisée dans le choix d'un isolant.

notamment être obtenues si une partie de la demande croissante de logements — mises en construction ou rénovations — l'était en tenant compte de normes de construction permettant des économies d'énergie. Parmi les mesures envisagées figurent : 1) la généralisation des enveloppes efficaces pour les nouveaux bâtiments (application des réglementations thermiques révisées périodiquement) ; 2) l'élimination progressive des lampes à incandescence ; 3) la rénovation thermique des bâtiments (isolation, fe-

nêtres) ; 4) la diffusion des appareils électroménagers, de chauffage et de climatisation efficaces ; et 5) la diffusion des chauffe-eau solaires. Les mesures prioritaires doivent par ailleurs être définies par zone climatique (voir encadré ci-dessous) selon leur potentiel d'économies d'énergie et leur viabilité économique.

Le scénario de rupture envisage également quelles seraient les évolutions sur l'emploi d'une telle politique.

HYPOTHÈSES DU SCÉNARIO DE RUPTURE DANS LES PSEM

Les hypothèses du scénario de rupture intègrent la définition de zones climatiques dans les PSEM et les technologies adaptées à celles-ci, ainsi que les définitions de celles concernant les taux de diffusion des mesures d'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment existant et neuf.

Les PSEM sont caractérisés par des climats qui varient du type méditerranéen au climat continental. Caractérisé par une saison fraîche relativement clémente et un été sec marqué, le climat, mais aussi la sismicité ont généré une réponse architecturale traditionnelle commune, fruit de justes compromis.

Les réglementations thermiques existantes des bâtiments dans les PSEM ont délimité des zones climatiques dans chaque pays. Un travail d'analyse et de synthèse est nécessaire pour dégager des zones climatiques homogènes à l'échelle des PSEM. Ainsi, il a été considéré pour l'exercice quatre climats représentatifs (Z1 à Z4) :

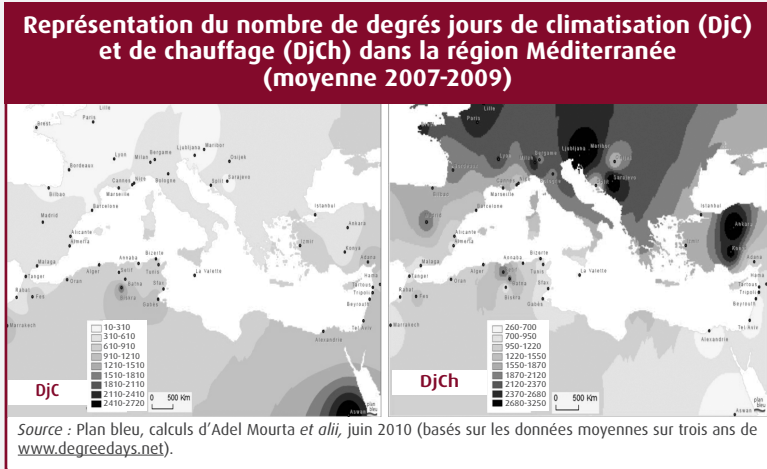
► **Z1 / zone côtière** (exemple : Beyrouth au Liban). Le climat est du type méditerranéen tempéré humide, caractérisé par des pluies concentrées en hiver et au début du printemps, et des étés chauds et secs avec une humidité relative assez élevée.

► **Z2 / zone relief** (type Marrakech au Maroc ou les Hauts-Plateaux en Algérie). Le climat est à tendance aride, caractérisé par de fortes amplitudes thermiques saisonnières et diurnes. Cette zone souffre d'un important déficit pluviométrique en été. En hiver, les températures sont fraîches la nuit. En revanche, en été les températures sont torrides.

► **Z3 / zone désert** (type Gafsa en Tunisie). Le climat y est très sec et chaud. Il y a, par contre, de très grandes différences de température entre le jour et la nuit.

► **Z4 / zone continentale** (type Ankara en Turquie). Les étés sont ensoleillés le jour et frais la nuit. Les hivers sont froids avec de la pluie et de la neige.

En complément de cette répartition climatique, un zonage basé sur les « degrés jours » est également de la plus grande utilité car il met en relief les besoins



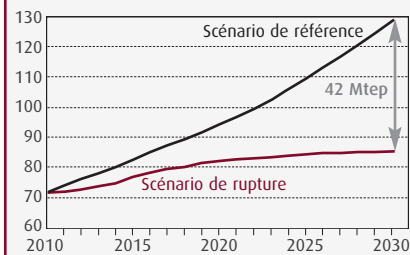
de chauffage et de rafraîchissement. Les cartes ci-dessus permettent de visualiser les besoins en chauffage et en rafraîchissement dans la région méditerranéenne. La température de référence choisie y est de 18 °C pour les degrés jours de chauffage et de 21 °C pour les degrés jours de climatisation. Visuellement parlant, plus la couleur est sombre, plus les besoins sont importants. Aussi, et comme nous pouvons le constater, les besoins des PSEM ont principalement trait au rafraîchissement tandis que ceux des PNM concernent davantage le chauffage.

E.H.E.A.

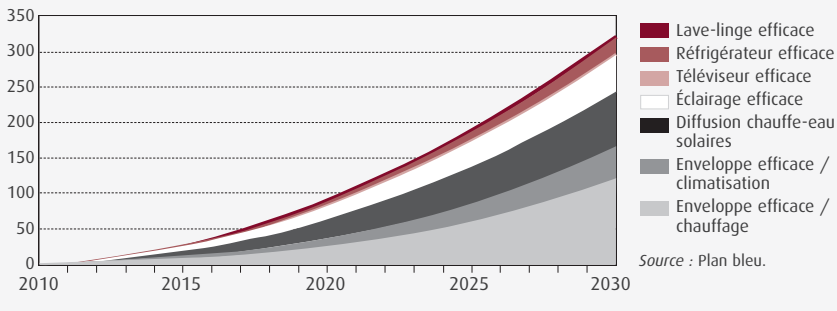
Impacts du scénario pour les PSEM

La mise en œuvre de ce scénario dans les PSEM révèle un potentiel d'économies d'énergie estimé à plus de 320 Mtep de gains cumulés d'énergie finale sur la période 2010-2030 dans le secteur du bâtiment, comme le montre le graphique 4. Les économies annuelles d'environ 40 Mtep concerneraient pour 41 % le gaz naturel, 34 % l'électricité, 22 % les produits pétroliers et 2 % le charbon. Les plus importantes réductions, selon les usages, émanent du chauffage et de la climatisation pour environ 60 %, suivis par l'éclairage pour près de 50 % et l'électroménager pour environ 33 %.

Graphique 3 — Consommations d'énergie finale du secteur résidentiel des PSEM selon les deux scénarios considérés (en Mtep)



À l'horizon 2030, en tenant compte de l'évolution du mix énergétique dans les PSEM et d'une pénétration des énergies renouvelables de l'ordre de 11 % à l'horizon 2030,

Graphique 4 — Gains cumulés d'énergie finale du secteur résidentiel des PSEM dans un scénario de rupture comparé à celui de référence (en Mtep)

la réduction annuelle des émissions de CO₂ serait, selon ce scénario, de l'ordre de 179 millions de tonnes de CO₂ (MtCO₂) dans les PSEM. La réduction cumulée des émissions de CO₂ sur la période 2007-2030 serait alors de 2 milliards de tCO₂ par rapport au scénario de référence (qui cumulerait près de 7 milliards de tCO₂ en 2030 soit 30 % de réduction)¹¹, dues uniquement aux efforts dans le secteur du bâtiment.

Besoins en investissement

Le Plan bleu a estimé à 262 milliards d'euros dans les PSEM, pour les 20 années à venir (tableau 2, page suivante), le montant supplémentaire des investissements nécessaires à la construction de bâtiments efficaces par rapport aux investissements réalisés pour la construction de bâtiments classiques. Ils conduiraient à un coût de la tonne de CO₂ évitée sur la durée de vie des logements entre 2010 et 2080 (durée de vie de 50 ans) compris entre 38 et 42 euros.

Estimation du potentiel d'emplois

En contrepartie, ce scénario a également un impact sur l'évolution des emplois. Selon les premières estimations du Plan bleu l'adoption des cinq mesures envisagées plus haut permettrait la création de plus de deux millions d'emplois dans les PSEM à l'horizon 2030. Ces estimations tiennent compte des emplois informels. Ces créations d'emplois sont conditionnées à la mise en place de politiques industrielles qui favorisent la production locale des matériaux et équipements nécessaires à la construction de logements efficaces. Le développement des filières et des compétences devrait permettre de réaliser des économies d'échelle. Compte tenu des gains de productivité réalisés dans les filières, les créations d'emplois pourraient être plus nombreuses dans les premières années et ralentir en fin de période.

**

11. Cumul de près de 6,8 milliards de tCO₂ pour le scénario *Business as Usual* (tendanciel) et de 4,7 pour le scénario de rupture sur la période 2007-2030, soit 30 % de réduction.

Tableau 2 — Besoins d'investissement pour les cinq mesures d'efficacité énergétique du scénario de rupture dans les PSEM (en milliards d'euros)

	Total sur 20 ans	Généralisation des enveloppes efficaces pour les nouveaux bâtiments	Rénovation thermique des bâtiments (isolation de la toiture, des murs et changement des fenêtres)	Élimination progressive des lampes à incandescence du marché et diffusion LBC / LED*	Diffusion des appareils électroménagers, de chauffage et de climatisation efficaces	Diffusion des chauffe-eau solaires
Algérie	33,3	16,5	6,1	0,4	5,3	5,0
Égypte	74,3	37,2	13,8	0,8	11,5	11,0
Israël	7,0	3,5	1,3	0,1	1,2	1,0
Jordanie	4,5	2,2	0,8	0,1	0,7	0,6
Liban	2,8	1,6	0,4	0,1	0,4	0,3
Libye	6,0	3,0	1,1	0,1	0,9	0,9
Maroc	30,3	15,1	5,6	0,4	4,8	4,4
Palestine	4,1	2,1	0,8	0,0	0,6	0,6
Syrie	19,2	9,6	3,5	0,3	3,1	2,8
Tunisie	3,6	1,2	1,4	0,0	0,5	0,5
Total	262,0	132,0	49,0	3,0	40,0	38,0

*LBC : lampes basse consommation ; LED : diodes électroluminescentes.

Source : *Énergie, changement climatique et bâtiment en Méditerranée : perspectives régionales*. Sophia Antipolis : Plan bleu, octobre 2010.

Le bâtiment est un secteur clef pour faire face à la nouvelle donne énergétique et climatique en Méditerranée, et diminuer substantiellement les émissions de gaz à effet de serre. Dans les PSEM, où le plus gros reste à faire en termes de structuration de la filière bâtiment, seule une action concertée entre les différentes parties prenantes (concepteurs, opérateurs et fournisseurs de matériaux d'isolation...) permettra l'émergence d'un marché pérenne de la construction durable. Il est donc urgent de repenser le bâtiment dans son ensemble et dans son contexte territorial.

Ces efforts doivent être portés en priorité sur le bâti neuf (du fait de l'importance de l'augmentation attendue du parc de logements neufs : plus de 60 %, soit 42 millions s'ajoutant aux 66 millions du

parc existant) pour lequel les solutions techniques appropriées au contexte méditerranéen sont identifiées, parmi lesquelles une meilleure prise en compte des pratiques traditionnelles en matière d'architecture en phase avec les principes bioclimatiques : apports solaires passifs, ventilation naturelle, orientation du bâtiment, etc. Développer un marché du bâtiment durable pérenne passe par une organisation de la filière, son financement et son accompagnement sur le long terme, à savoir la mise en place d'une filière du bâtiment durable (accompagnement institutionnel adapté ; accès aux financements internationaux ; cadre réglementaire...), le financement du bâtiment durable (mise en place d'outils incitatifs ; développement des partenariats public-privé) ; et la pérennisation du marché du bâtiment durable (contrôle

qualité des équipements et réalisations, formation des professionnels).

Les effets attendus du scénario de rupture du Plan bleu sont nombreux : la conception d'innovations techniques permettant une rationalisation et une meilleure efficacité de l'utilisation de l'énergie ; une création d'emplois grâce à la promotion d'instruments et de technologies performants, principalement dans le secteur du bâtiment ; et une gestion plus durable des demandes en énergie s'appuyant sur des instruments économiques incitatifs, et

tenant compte des dimensions sociales et environnementales ; et finalement des réductions sensibles des émissions de CO₂.

Au total, c'est à une action déterminée en faveur du secteur du bâtiment que sont invités à s'engager les pays méditerranéens. Les programmes de rénovation au nord, et de construction au sud, ouvrent un large champ de futurs possibles pour la région. Aux acteurs concernés de choisir les options les moins coûteuses en énergie et les plus sobres en matière d'émissions. ■

FUTURIBLES INTERNATIONAL - 29 et 30 SEPTEMBRE 2011

STRATÉGIES URBAINES

INTERVENANTS

Soizick Angomard, directrice de Maios, ex-directrice adjointe de la Société d'aménagement du projet Île de Nantes ; **Julien Damon**, professeur associé à Sciences Po Paris (cycle d'aménagement et d'urbanisme) ; **Jean Haëntjens**, urbaniste, directeur d'Urbatopie (conseil en stratégies urbaines) ; **Hugues de Jovenel**, directeur général du groupe Futuribles ; **Véronique Lamblin**, directrice d'études à Futuribles ; **Paul Lecroart**, urbaniste à l'Institut d'aménagement et d'urbanisme Île-de-France ; **Pierre Tridon**, directeur de l'Agence d'urbanisme et de développement de la région de Reims.

OBJECTIFS

L'objectif annoncé d'un changement de paradigme urbain appelle un renouvellement des méthodes et des pratiques de l'urbanisme. L'objet de cette formation est de tirer de l'expérience de villes pionnières d'une approche stratégique de l'urbanisme (Barcelone, Bilbao, Copenhague, Lyon, Rennes, Nantes...) quelques notions simples, applicables à toutes les villes. Que signifie la notion de stratégie appliquée aux politiques urbaines ? Quels changements implique-t-elle dans les principes, les méthodes et les compétences ? Quels sont les résultats ? Comment permet-elle d'aborder les défis du XXI^e siècle, qui sont ceux de la ville en compétition, de la ville de l'après-pétrole, mais aussi de la ville à vivre ?

PROGRAMME

- **Fondements et principes de l'approche stratégique** : ville durable et approche stratégique de l'urbanisme ; recherche de résonances et cohérences ; mobilisation des acteurs...
- **Les stratégies comparées de Lyon et Hambourg**
- **Approches stratégiques de Nantes et de Reims**
- **Contraintes et méthodes de l'approche stratégique** : la contrainte du temps ; les clefs de la cohérence ; la gouvernance ; les résultats des démarches de stratégie urbaine
- **Évolutions des attentes externes** (l'attractivité) et internes (la ville à vivre)
- **La transition énergétique et la ville post-carbone** : faisabilité et études de cas
- **Synthèse sur la nouvelle donne** : principes de la ville frugale
- **Stratégie urbaine** : travail collectif sur quelques aires urbaines (atelier)

PRIX

Les frais de participation sont de 1 200 euros HT, soit 1 435,20 euros TTC*, payables lors de l'inscription à Futuribles International (déclaré organisme de formation). Ils comprennent la participation à l'ensemble de la formation, les déjeuners et le dossier de base remis aux participants.

RENSEIGNEMENTS COMPLÉMENTAIRES

Programme détaillé consultable sur le site Internet www.futuribles.com/formation.html ou envoyé sur demande auprès de Corinne Roëls, Futuribles International, 47, rue de Babylone - 75007 Paris - France • Tél. : 33 (0)1 53 63 37 71
Fax : 33 (0)1 42 22 65 54 • E-mail : croels@futuribles.com

*Remise de 10 % en cas d'inscription multiple dès la deuxième participation, dispense de frais pour les membres partenaires de Futuribles International et remise de 50 % pour les membres associés (valable pour une personne par formation).

Le scénario Négatep

UN SCÉNARIO DE LUTTE
CONTRE LE RÉCHAUFFEMENT CLIMATIQUE

PAR CLAUDE ACKET ET PIERRE BACHER ¹

Les exercices de prospective dans le domaine de l'énergie et de la lutte contre le changement climatique se sont multipliés ces dernières années, comme on a pu le voir au fil des articles consacrés à ces questions dans Futuribles en 2011 (dans ce numéro spécial comme dans celui d'avril). Il est vrai que les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, en France notamment, sont assez ambitieux, la loi française d'orientation sur l'énergie de 2005 visant une division par quatre des rejets de gaz carbonique.

Parmi ces scénarios, le scénario Négatep, élaboré par Claude Acket et Pierre Bacher dans le cadre de l'association Sauvons le climat, propose d'atteindre cet objectif (dit « facteur 4 ») en France à l'horizon 2050, en divisant par quatre le recours aux énergies fossiles, qu'il s'agit de remplacer le plus possible par de l'électricité produite à partir de sources non émettrices de gaz carbonique — essentiellement le nucléaire et les énergies renouvelables. Ses auteurs en présentent ici les ambitions chiffrées, comparées au scénario de référence, et la route à suivre pour y parvenir, en particulier dans le résidentiel et le tertiaire, les transports et l'industrie (via la maîtrise des besoins et le recours aux sources alternatives).

Ils terminent par une comparaison du scénario Négatep avec deux autres scénarios plus récents visant aussi à réduire les émissions de gaz à effet de serre, en Europe d'une part, et en Allemagne de l'autre. Une comparaison qui les conforte dans leur choix de miser sur l'électricité comme substitut au pétrole, et qui les interpelle quant aux conséquences (redoutables selon eux) que pourrait avoir le remplacement du nucléaire et du charbon en Europe par des énergies re-

1. Membres du conseil scientifique de l'association Sauvons le climat (site Internet www.sauvonsleclimat.org).

nouvelables intermittentes, en termes de coûts mais aussi de réseau électrique. S.D. ■

Limiter le réchauffement climatique et se passer des énergies fossiles

Aujourd'hui, au niveau mondial, plus de 80 % de la fourniture énergétique viennent des combustibles fossiles. En dépit des pénuries plus ou moins lointaines qui se profilent, le maintien au cours de ce XXI^e siècle d'une forte dépendance vis-à-vis de ces combustibles fossiles et surtout vis-à-vis du charbon, soulève la question primordiale des risques liés au réchauffement climatique. Une telle dépendance ne va-t-elle pas conduire, par les rejets de gaz carbonique qu'elle entraînerait, à un accroissement de l'effet de serre aux conséquences dramatiques ?

Les combustibles fossiles constitués à partir de carbone dégagent, lors de leur combustion, du gaz carbonique (CO₂) qui vient s'ajouter à celui déjà présent autour de notre planète. Notre atmosphère est en effet constituée d'une couche de gaz, parmi lesquels les gaz dits à effet de serre. Si nous pouvons lire ces lignes, remercions ces gaz car sans eux la température moyenne de la Terre ne serait pas de 15 °C, mais de - 18 °C, et la planète ne serait qu'un énorme glaçon sans eau liquide et sans vie. Ce phénomène d'effet de serre est donc vital. Mais qu'advient-il si, du fait de l'activité humaine, il s'amplifie et conduit à un réchauffement devenant par son ampleur source de catastrophes climatiques ?

Depuis plus de 400 000 ans et jusqu'à l'ère industrielle, la teneur en gaz carbonique est restée inférieure à 280 ppm (parties par million). Elle dépasse aujourd'hui 380 ppm. Seule la moitié des 30 milliards de tonnes de gaz carbonique que nous émettons par an, est absorbée par la nature. L'autre moitié vient s'ajouter aux 2 800 milliards de tonnes déjà présentes dans l'atmosphère.

Pour le futur, toutes les modélisations prédisent, d'ici 2100, une élévation des températures mondiales de 2 °C à 6 °C, plus de la moitié de l'incertitude provenant du choix des scénarios d'émission de CO₂. Pour limiter cette élévation à 2 °C, valeur considérée par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) comme celle qu'il serait prudent de ne pas dépasser, il faudrait que les émissions mondiales soient en ce siècle divisées par un facteur 2 et que, par habitant, les rejets annuels soient inférieurs à deux tonnes².

Pour réduire les émissions, on peut agir dans deux directions complémentaires : diminuer la consommation d'énergie chaque fois que c'est pos-

2. L'Européen moyen rejette aujourd'hui entre 6 et 10 tonnes de gaz carbonique par an. Les Français comme les Suisses et les Suédois sont dans le bas de la fourchette grâce à une électricité produite avec très peu de combustibles fossiles (nucléaire et hydraulique).

sible et utiliser des sources d'énergie n'émettant pas de gaz à effet de serre, c'est-à-dire limiter le plus possible l'utilisation des combustibles fossiles³. En France, ceci est exprimé dans la loi d'orientation sur l'énergie de 2005, qui définit quatre grands axes d'action : économiser l'énergie ; « décarboner » l'énergie utilisée ; développer les énergies renouvelables ; et maintenir le nucléaire pour la production d'électricité.

Les trois premiers axes ont été confirmés et précisés par le Grenelle de l'environnement⁴, sans toutefois accompagner les choix d'évaluations coûts / bénéfices, pourtant prévues par la loi. Le nucléaire ayant été placé par le gouvernement français en dehors des sujets à traiter par le Grenelle, celui-ci, probablement pour compenser, a préféré « oublier » que l'électricité pouvait jouer un rôle majeur dans le remplacement des combustibles fossiles, tant pour les usages fixes de l'énergie que dans les transports.

Au contraire, le scénario Négatep⁵, pensant à la compétitivité des entreprises nationales, au budget de l'État et à celui des citoyens-consommateurs, en particulier les plus défavorisés, frappés de plein fouet par la hausse des prix de l'énergie, écarte les voies trop coûteuses. Négatep, aux côtés d'efforts importants mais raisonnables de maîtrise de l'énergie et d'un fort développement des énergies renouvelables thermiques, donne une place de choix à l'électricité comme substitut aux combustibles fossiles, celle-ci étant produite par des sources non émettrices de gaz carbonique, dont le nucléaire et une part financièrement et techniquement raisonnable de renouvelables.

En partant de la situation actuelle et en montrant ce qui pourrait se passer en l'absence de politique volontariste de lutte contre les émissions de gaz carbonique (scénario dit « de référence »), nous aborderons successivement la maîtrise des besoins, les sources alternatives d'énergie (renouvelables thermiques et électriques) pour enfin présenter le scénario Négatep proprement dit, et le comparer à des scénarios européens et allemands.

Le scénario de référence

Le bilan ressources-emplois de l'énergie en 2008 (tableau 1, page suivante)⁶ montre que les énergies fossiles représentent 70 % des énergies finales

3. Une solution complémentaire, la séquestration du gaz carbonique, est en cours de développement. Peut-elle se déployer à grande échelle ? Nous en parlerons plus loin.

4. Processus participatif lancé en 2007 en France, visant à prendre des décisions de long terme en matière d'environnement et de développement durable, ayant notamment débouché sur deux séries de lois (Grenelle I en juin 2009, et Grenelle II en juillet 2010) (NDLR).

5. ACKET Claude, BACHER Pierre. « Diviser par quatre les rejets de CO₂ dus à l'énergie : le scénario Négatep ». *Revue de l'énergie*, vol. 61, n° 596, juillet-août 2010, pp. 244-252.

6. Nous utiliserons généralement comme unité d'énergie la tonne d'équivalent pétrole (tep) et ses multiples (Mtep, million de tep) ; dans certains domaines, le kilowattheure (kWh) et ses multiples (MWh, millier de kWh, et TWh, térawattheure, milliard de kWh) sont communément utilisés : pour faciliter la lecture, nous utilisons alors et donnons les quantités dans les deux unités. Rappelons que 1 tep = 11,6 MWh = 41,86 GJ (milliards de joules).

Tableau 1 — Bilan ressources-emplois de l'énergie finale en France en 2008 (en Mtep)

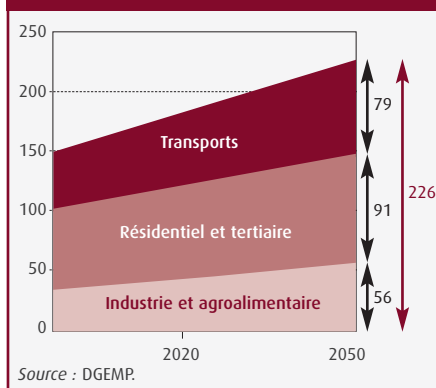
	Charbon	Pétrole	Gaz	Électricité	Renouvelables thermiques	Total	Total (%)
Industrie	5,7	5,1	13,7	11,6	1,3	37,4	23
Résidentiel et tertiaire	0,4	13,2	25	23,9	8,9	71,4	44
Agriculture	–	3,4	0,3	0,6	0,1	4,4	2
Transports	–	46,9	1	2	2	49,9	31
Total	6,1	68,6	39,1	37,2	12,3	163,1	100

Contexte : appel direct au charbon, pétrole, gaz, renouvelables thermiques. L'électricité* fait elle-même appel au nucléaire, aux renouvelables électriques et aux fossiles.

*Partant de la production brute d'électricité de 575 TWh (nucléaire : 440 TWh ; thermique fossile : 60 TWh ; renouvelables : 75 TWh), nous aboutissons à la consommation finale de 433 TWh, en soustrayant les 48 TWh du solde exportations – importations, les besoins propres de la production (auxiliaires, enrichissement) et les pertes en ligne.

consommées en France (114 Mtep)⁷ et que les secteurs résidentiel-tertiaire et transports sont les plus gros contributeurs, en termes tant d'énergie finale consommée que d'énergies fossiles et d'émissions de CO₂. L'industrie arrive assez loin derrière, grâce aux progrès réalisés en matière d'efficacité énergétique à la suite des chocs pétroliers des années 1970 mais aussi, malheureusement, à la délocalisation de nombreuses activités.

Graphique 1 — Énergies finales dans le scénario de référence DGEMP 2008 (en Mtep)



Les 120 Mtep d'énergies fossiles consommées sont responsables de près de 115 millions de tonnes de carbone (tC) contenu dans le CO₂ émis⁸. Très globalement, pour diviser ces rejets par quatre, il faut diviser par quatre la consommation d'énergies fossiles et la ramener dans une fourchette de 30 à 40 Mtep.

Ce constat reste largement vérifié dans le scénario de référence proposé par la Direction générale de l'énergie et des matières premières (DGMEP) et l'Observatoire de l'énergie (OE) en 2008⁹. Ce

7. Environ 5 Mtep supplémentaires d'énergies fossiles sont consommées pour la production d'électricité en semi-base (intermédiaire entre la production de base et celle de pointe) et en pointe, et pour le raffinage du pétrole, ce qui porte la consommation totale d'énergies fossiles à environ 120 Mtep.

8. Les productions de CO₂ prises en compte dans Négatep sont : 1,17 tC par tep de charbon, 0,89 tC par tep de pétrole et 0,74 tC par tep de gaz naturel.

9. Scénario énergétique de référence DGEMP-OE 2008. Paris : DGEMP-OE, 2008.

scénario ferait passer la consommation d'énergie finale de 162 Mtep en 2006 à 184 Mtep en 2020, et 226 en 2050, sans modification profonde de la part des énergies fossiles. La répartition entre secteurs est illustrée par le graphique 1.

La maîtrise des besoins

Secteurs résidentiel et tertiaire

L'imposition des réglementations thermiques (RT) a progressivement limité les déperditions de chaleur de l'habitat neuf. Alors que la moyenne de celles-ci est de 320 kWh par mètre carré et par an pour l'ancien antérieur à 1975, les règles ont imposé 100 (RT 2000), 80 (RT 2005) puis 50 kWh par mètre carré et par an (RT 2012), ce dernier chiffre s'appliquant non plus à l'énergie finale consommée mais à l'énergie primaire nécessaire. Comme l'a souligné l'OPECST¹⁰, il ne faut toutefois pas s'attendre à une baisse aussi importante de la consommation ; en effet, les chiffres sont des valeurs normalisées théoriques et non réelles d'utilisation. Ainsi, par exemple, les dépenses de chauffage étant plus faibles, une famille passant d'un logement mal isolé à un nouveau rénové hésitera moins à monter la température des pièces, dont celle des chambres.

Mais l'imposition de normes de plus en plus sévères pour le neuf peut s'avérer de plus en plus coûteuse et globalement improductive, en absorbant l'essentiel des moyens financiers qui seraient mieux employés dans la rénovation de l'ancien. La rénovation de l'ancien, qui représente plus des deux tiers du parc existant, devrait être prioritaire. Elle peut se faire selon deux scénarios¹¹. Le premier vise à engager en une seule fois des travaux lourds permettant d'atteindre une isolation très poussée. Le second, dit « de rénovation diffuse », consisterait, au fur et à mesure des travaux normaux d'entretien, à utiliser systématiquement les meilleurs matériaux et matériels, et les meilleures techniques (fenêtres et huisseries, chaudières modernes...).

Le premier scénario risque d'entraîner des coûts très élevés, supérieurs à 20 000 euros par logement et cela pour une diminution théorique des pertes de 75 %. Le second scénario permettrait de réduire les pertes d'environ 50 % ; le surcoût par rapport aux travaux d'entretien normaux serait faible (quelques milliers d'euros) et largement compensé en quelques années par la réduction de la facture de chauffage. La comparaison des coûts de ces deux scénarios illustre parfaitement la loi des rendements décroissants. Il faut compter, en rénovation diffuse, un surcoût d'environ 5 000 euros pour réduire la demande de 20 à 10 MWh par an et par logement,

10. BATAILLE Christian, BIRRAUX Claude. *La Performance énergétique des bâtiments : comment moduler la règle pour mieux atteindre les objectifs ?* Paris : OPECST (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques), décembre 2009.

11. ORSELLI Jean. *Économies et substitutions d'énergie dans les bâtiments*. Paris : Conseil général des Ponts et Chaussées, rapport n° 004831-01, février 2008.

mais en rénovation lourde, plus de 20 000 euros pour la réduire de 20 à 5 MWh par an. Le prix du MWh économisé est près de trois fois plus élevé dans le scénario lourd et le prix marginal, pour passer de 10 à 5 MWh par an, près de six fois plus élevé.

Négatop retient le second scénario qui, à enveloppe budgétaire globale donnée, permet plus de gains. L'économie serait de 125 TWh (soit 11 Mtep) par rapport au scénario de référence. À ces économies d'isolation, il faut en ajouter d'autres, comme celles provenant du remplacement de moyens de chauffage (par exemple, chaudières à condensation) dont on peut attendre près de 3 Mtep d'économies d'énergie.

Les besoins autres que le chauffage (besoins spécifiques d'électricité, eau chaude sanitaire, cuisson...), dans l'ancien comme dans le neuf, peuvent être satisfaits avec des énergies renouvelables et de l'électricité, ce que nous verrons plus loin.

Dans le secteur tertiaire, le scénario de référence prévoit environ 32 Mtep pour 2050. Aux mêmes voies classiques, techniques, de maîtrise de l'énergie utilisées pour l'habitat devrait s'ajouter la gestion de l'intermittence dans l'occupation de nombreux locaux. Compte tenu de ces éléments qualitatifs, nous admettons que les besoins du secteur tertiaire pourraient se stabiliser à leur niveau actuel, soit environ 23 Mtep.

Secteurs industrie et agroalimentaire

L'extrapolation du scénario de référence aboutit à 56 Mtep en 2050 (hors besoins nouveaux liés au développement d'une industrie des biocarburants). L'industrie a fait un gros effort, après les chocs pétroliers des années 1970, pour améliorer son efficacité énergétique d'environ 25 %. Même si le plus facile a été fait, l'objectif retenu est une nouvelle amélioration équivalente d'ici 2050. La consommation totale des industries traditionnelles en 2050 serait alors pratiquement stabilisée au niveau de 2006. Nous verrons plus loin qu'il y aurait lieu d'y ajouter les besoins d'énergie d'une nouvelle industrie, celle de la synthèse de biocarburants.

Secteurs des transports

Le transport des biens et des personnes utilise aujourd'hui presque exclusivement le pétrole et il n'existe pas, à court terme, de véritables énergies disponibles pour une substitution massive. Certes, des progrès technologiques importants ont permis d'améliorer fortement l'efficacité des moteurs automobiles. Mais cette amélioration a été plus que compensée par l'imposition de normes plus sévères de sécurité et antipollution hors CO₂, par l'orientation du public vers des véhicules plus puissants et par l'augmentation du trafic automobile. Seules les mesures gouvernementales en faveur des voitures à bas rejets de CO₂ (bonus-malus) ont récemment contribué à inverser la tendance.

Le scénario de référence conduit à 79 Mtep en 2050. Par rapport à cette tendance, on peut espérer la poursuite et la généralisation des progrès technologiques ¹². Mais il faudrait surtout compter sur la mise en valeur des transports en commun et une modification du comportement de chacun pour permettre de réduire les besoins de 50, actuellement, à 40 Mtep ¹³, soit à la moitié du niveau tendanciel.

Contrairement aux secteurs résidentiel et tertiaire, il est très difficile, pour le secteur transports, d'évaluer les coûts liés à la diminution des besoins : les progrès technologiques ont probablement un coût (le coût de la tonne de pétrole évitée par l'opération bonus-malus est très élevé), le changement des comportements individuels peut permettre d'économiser de l'argent (conduite sage, covoiturage), les investissements dans les transports en commun sont très lourds, mais ne doivent pas être imputés à la seule recherche d'économie d'énergie, pas plus que l'aménagement urbain, etc.

Maîtrise des besoins : récapitulatif

Au total, les mesures d'économies proprement dites représenteraient près de 75 Mtep d'énergie finale par rapport au scénario de référence, soit pratiquement un tiers. Il faut remarquer toutefois que des transferts d'une énergie vers une autre modifieront ces chiffres, comme nous le verrons plus loin ¹⁴.

Les sources alternatives « décarbonées » d'énergie

La partie précédente, relative aux usages des énergies, présentait des chiffres d'énergie finale, celle-ci étant celle qui est fournie à l'utilisateur (carburant automobile à la pompe, kWh électrique à la prise de courant...). Lorsque que l'on remonte aux sources d'énergie (pétrole brut, énergie nécessaire pour produire l'électricité...) et aux rejets de CO₂ liés à l'énergie, on est obligé de parler d'énergies primaires. C'est ce qui est fait dans cette partie.

Les seules sources d'énergie susceptibles d'être largement non carbonées sont les énergies renouvelables thermiques, l'électricité produite à l'aide du nucléaire ou d'énergies renouvelables, et les énergies fossiles associées au captage et stockage du CO₂ (CSC).

12. Dans la continuité : notamment l'injection directe et haute pression, la distribution variable, l'accroissement de la puissance spécifique, l'adaptation des moteurs aux besoins réels (*downsizing*).

13. Nous verrons plus loin que le remplacement d'une partie du parc automobile par des véhicules électriques permettrait de substituer 15 Mtep d'énergie finale pétrole par 5 Mtep d'électricité.

14. Un exemple simple : le remplacement d'une chaudière à gaz par une chaudière à bois de rendement plus faible diminue les rejets de CO₂, mais augmente l'énergie consommée.

Énergies renouvelables thermiques

Les énergies renouvelables trouvent leur terrain de prédilection dans le domaine de la chaleur. Elles peuvent apporter une contribution très importante :

— Le bois et les divers déchets agricoles et ménagers, qui fournissent déjà près de 10 Mtep, pourraient facilement en fournir directement plus du double, voire plus avec le développement de la production de biocarburants. Au total, Négatep retient une fourchette de 30 à 35 Mtep.

— Le solaire thermique pourrait facilement fournir les trois quarts de l'eau chaude sanitaire et une partie limitée du chauffage des maisons individuelles. Au total, il pourrait apporter une contribution de 3 à 5 Mtep.

— Une forte extension est à prévoir pour la géothermie de surface et l'aérothermie, basées sur l'utilisation de pompes à chaleur. La contribution peut être estimée à 9 Mtep : 7 Mtep tirées du sol ou de l'air et 2 Mtep apportées indirectement par les pompes à chaleur électriques.

— La géothermie semi-profonde ou profonde, encore peu développée (0,2 Mtep) devrait un peu s'étendre.

Au total, ce sont environ 45 Mtep de chaleur qui pourraient être produits par les renouvelables, à partager entre les différents secteurs.

Électricité

Pour ne pas contribuer aux rejets de CO₂, l'électricité doit être produite avec des énergies non carbonées : énergie nucléaire et énergies renouvelables, l'appel aux combustibles fossiles à grande échelle imposant la séquestration du gaz carbonique.

Le nucléaire produit aujourd'hui près de 80 % de l'électricité française. Techniquement et économiquement, cette proportion pourrait être conservée, par exemple en remplaçant, d'ici 2050, les réacteurs actuels par des EPR (*Evolutionary Power Reactors*)¹⁵. Ceci pose évidemment des problèmes tels que l'ouverture éventuelle de nouveaux sites et le démantèlement des centrales arrivées en fin de vie¹⁶, la mise en œuvre du stockage définitif des déchets à vie longue¹⁷, l'approvisionnement en ura-

15. La puissance moyenne des réacteurs actuels est proche de 1 000 MW, celle de l'EPR de 1 700 MW et, par conception, le facteur de charge de l'EPR devrait être supérieur de 5 % à 10 %.

16. Certains des sites actuels peuvent accueillir de nouveaux réacteurs (Flamanville, Penly par exemple), mais pas tous. Compte tenu des délais nécessaires pour le démantèlement des centrales arrivées en fin de vie, cela ne serait pas suffisant.

17. Les quantités totales de déchets à vie longue à stocker, en cas d'exploitation de réacteurs à eau (actuels et EPR) jusqu'à la fin du siècle, seraient multipliées par trois environ par rapport à ce qui est engagé aujourd'hui. Par comparaison, le retraitement du combustible pour en extraire le plutonium permet de diviser par 10 la radioactivité des déchets à stocker. Rappelons que le stockage des déchets à vie longue a fait l'objet de deux lois (1991, 2006) et que la seconde a confirmé le choix du stockage géologique de ces déchets.

nium¹⁸. Sans parler des questions d'acceptabilité sociale qui affectent tous les grands projets d'infrastructure, aussi bien dans le secteur de l'énergie que dans celui des transports.

Le charbon avec séquestration du CO₂ est à ce jour dans une phase de recherche préindustrielle. Cette technique sera probablement indispensable dans les pays qui font largement appel au charbon et au gaz, et les Allemands l'ont retenue à partir de 2030 (voir *infra*). Le scénario Négatep ne retient pas cette option, coûteuse et moyennement efficace, pour la France.

Le gaz naturel est appelé à remplacer le charbon et le pétrole pour faire face aux aléas des productions intermittentes d'électricité (éolienne et solaire)¹⁹. Mais la contrainte sur le CO₂ conduit, par contrecoup, à limiter la capacité des renouvelables intermittentes.

S'agissant des énergies renouvelables, la France s'est engagée, au niveau européen, à faire appel à elles pour 20 % de son énergie d'ici 2020²⁰. En allant au-delà de cet engagement, le Grenelle de l'environnement a prévu 23 %, dont un fort développement de l'électricité renouvelable. Aujourd'hui, l'énergie renouvelable la plus importante en France est l'hydraulique (64 TWh) qui devrait peu évoluer. L'hydraulique joue un rôle essentiel dans la stabilité du réseau face aux variations rapides de l'équilibre entre les besoins et la production. Mais les limites semblent atteintes et l'hydraulique ne peut pratiquement plus rien apporter en cas de fort développement des sources intermittentes. Le bois et les déchets carbonés peuvent contribuer un peu à la production d'électricité, notamment dans des installations de cogénération (chaleur et électricité). Ceci pourrait fournir environ 11 TWh. Pour l'éolien, le Grenelle de l'environnement prévoit l'installation de 19 GW terrestres et 6 GW *offshore* d'ici 2020, le tout devant produire 62 TWh soit 5,3 Mtep. Deux facteurs — l'intermittence et le coût — vont limiter le développement de l'éolien (voir encadré page suivante), pour aller bien au-delà de ces engagements 2020. L'électricité d'origine solaire photovoltaïque souffre du même inconvénient de l'intermittence que l'électricité éolienne, mais avec une meilleure prévisibilité et une amplitude plus faible des variations brusques. Mais elle est encore beaucoup trop chère et devra faire de gros progrès pour être compétitive avec les autres énergies. Le Grenelle de l'environnement a fixé

18. Pour la plupart des minerais, les quantités recouvrables dépendent fortement du prix que l'on est prêt à payer. Or l'uranium naturel ne représente que 2 % à 3 % du coût du MWh nucléaire, ce qui fait que même une multiplication par 5 à 10 de son coût, sans être négligeable, n'aurait pas de conséquences majeures.

19. Les variations rapides de production éolienne et solaire sont compensées d'abord par l'hydraulique de barrage et de pompage, dont les capacités sont limitées, puis par les centrales thermiques ; mais pour ces dernières, seules les turbines à gaz sont capables de réagir suffisamment vite. Dans les pays disposant d'une très grande puissance installée de centrales au charbon, comme l'Allemagne, celles-ci peuvent également contribuer à faire face aux intermittences, à condition d'être déjà en fonctionnement et moyennant une fatigue supplémentaire des matériels.

20. Dans le cadre de la formule dite « 3 fois 20 en 2020 » (voir aussi la tribune européenne de Jean-François Drevet, en p. 139 de ce numéro [NDLR]).

INTERMITTENCE ET COÛT ACTUEL DE L'ÉLECTRICITÉ ÉOLIENNE

L'intermittence de la production électrique éolienne

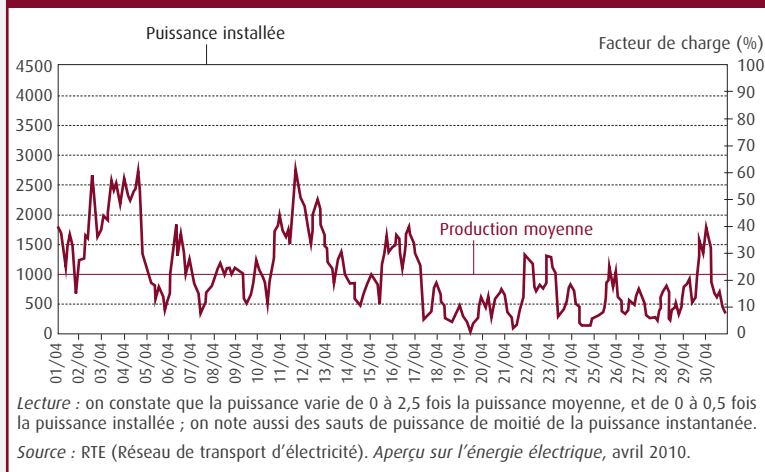
La puissance d'une éolienne étant proportionnelle au cube de la vitesse du vent, la puissance débitée sur le réseau est très variable, comme l'illustre le graphique ci-dessous, et la mise en ligne sur un réseau électrique peut être problématique. En effet, l'électricité n'est pas stockable. Il faut à chaque instant respecter l'équilibre entre la production et la consommation. À côté des éoliennes, des moyens de production complémentaires devront être prêts à intervenir, pour corriger, en plus ou en moins, les écarts de puissance de l'éolien.

Le coût actuel de l'éolien

Bien que la ressource (le vent) soit gratuite, le coût de l'éolien est très élevé : lorsqu'il débite sur le réseau, l'éolien se substitue la plupart du temps au nucléaire, permettant d'économiser son combustible (5 à 6 euros le MWh), alors que son prix de vente à EDF (Électricité de France) est de 82 euros le MWh pour l'éolien terrestre et de 130 euros le MWh pour l'éolien *offshore*. Le retour sur investissement, compte tenu du faible facteur de charge, est problématique, d'autant que la variabilité constatée ci-dessous conduit à prévoir d'autres investissements aussi à amortir.

C.A., P.B.

Variation de la puissance éolienne en France au cours du mois d'avril 2010 (en MW)



comme objectif 5,4 GW en 2020, produisant 5,8 TWh, objectif pratiquement atteint en 2010²¹. Le scénario Négatep retient 20 TWh en 2050, ce chiffre étant très incertain. Au total, on peut penser que l'électricité renouvelable pourrait, en France, en 2050, fournir 175 TWh.

21. Dans un contexte spéculatif, avec un coût de rachat de l'électricité pouvant atteindre 10 fois celui du marché, situation non soutenable à terme.

Le remontage Négatep

Un objectif de coût minimum

L'objectif « facteur 4 » se traduit par une baisse moyenne des énergies fossiles de 40 Mtep par an d'ici 2050, soit un total de 1 600 Mtep. Très globalement, cela se traduit par le remplacement de dépenses de combustibles fossiles par des dépenses dans les moyens d'économiser ou de substituer des énergies non carbonées. Rien qu'en investissements, l'ordre de grandeur de ces transferts est de plusieurs dizaines de milliards d'euros par an, ce qui justifie pleinement le parti pris du scénario Négatep de privilégier les voies les moins coûteuses, sans se cacher que les coûts du remplacement des énergies fossiles dans leurs usages fixes se situeront dans une plage de 500 à 1 000 euros par tep économisée, et dans leurs usages mobiles de 1 500 à 2 000 euros par tep économisée ²². L'encadré ci-après développe plus particulièrement les aspects économiques de la production d'électricité. Il montre que le surcoût induit par le remplacement de 40 % de production nucléaire par 40 % d'énergies renouvelables intermittentes se chiffre en dizaines de milliards d'euros, même s'il est impossible de donner une évaluation précise compte tenu des différentes incertitudes.

Usages fixes de l'énergie

Dans les secteurs des usages fixes de l'énergie, le scénario Négatep écarte les solutions extrêmes d'économie d'énergie très coûteuses dans l'habitat ancien, au bénéfice de solutions mixtes (« rénovation diffuse ») et d'une utilisation intelligente de l'électricité (pompes à chaleur et chauffage direct effaçable aux heures de pointe). Dans l'habitat nouveau, le scénario repose sur la nécessité de limiter les surcoûts élevés qui freineraient son développement : une architecture qui limite raisonnablement les besoins d'énergie (autour de 70 kWh par mètre carré en énergie finale) ²³, associée à l'électricité et aux énergies renouvelables.

Dans le secteur tertiaire, les besoins étant stabilisés au niveau actuel (23 Mtep), le remplacement de 10 Mtep d'énergies fossiles serait assuré pour moitié par des énergies renouvelables et pour moitié par l'électricité.

Dans les secteurs industriel et agroalimentaire, les besoins traditionnels étant également stabilisés (40 Mtep), les gros consommateurs feront probablement de plus en plus appel à l'électricité, au fur et à mesure que le prix

22. BACHER Pierre. « Prix du pétrole équivalent, prix du gaz équivalent et coût du CO₂ évité ». *Revue de l'énergie*, n° 582, mars-avril 2008.

23. La réglementation thermique RT 2012 se base malheureusement sur l'énergie primaire et non sur l'énergie finale. Ceci pousse à favoriser le chauffage à gaz, fort émetteur de gaz carbonique. Or, l'isolation thermique n'agit que sur l'énergie finale. Il serait préférable de faire référence à cette dernière et en parallèle, comme le recommande l'OPECST, d'imposer des limites sur les rejets de gaz carbonique associés au mode de chauffage choisi.

du CO₂ augmentera. Les énergies renouvelables devraient également voir leur part augmenter. Négatep retient, pour ces deux sources d'énergie, les chiffres du scénario de référence.

À ces besoins viennent s'ajouter ceux d'une industrie nouvelle de synthèse de biocarburants, abordée ci-dessous.

Usages mobiles de l'énergie

Dans le domaine du transport, Négatep admet que les mesures d'économie d'énergie et d'efficacité énergétique permettraient, d'ici 2050, de réduire les besoins à 40 Mtep. Mais comment remplacer le pétrole qui satisfait aujourd'hui l'essentiel des besoins ? Négatep écarte le remplacement par des combustibles liquides synthétiques, produits à partir de combustibles fossiles, ainsi qu'une contribution importante des biocarburants de première génération, qui sont en concurrence avec les besoins alimentaires. Restent en piste les biocarburants de deuxième génération et les motorisations électriques.

Les biocarburants de deuxième génération

Les biocarburants de deuxième génération valorisent la totalité de la masse ligno-cellulosique, mais avec un rendement de procédé de 50 %. L'énergie consommée doit être non carbonée, fournie soit par la biomasse elle-même (autoconsommation), soit par de l'électricité, soit par un mélange des deux. Au total, compte tenu de la disponibilité limitée de la biomasse, Négatep retient une production de 15 Mtep de biocarburants, obtenue à partir de 22,5 Mtep de biomasse (dont 7,5 pour fournir de l'énergie) et 7,5 Mtep d'électricité.

Les motorisations électriques

L'utilisation de l'électricité peut être directe, dans les transports en commun, mais aussi s'étendre aux transports individuels grâce au développement des batteries pour les véhicules 100 % électriques ou hybrides rechargeables. Au total, avec les véhicules électriques et hybrides, c'est l'équivalent de 15 Mtep de pétrole qui devraient pouvoir être remplacées par 5 Mtep d'électricité ²⁴.

Au total, concernant les usages mobiles de l'énergie, le remplacement de 15 Mtep de pétrole par 5 Mtep d'électricité ramène les besoins d'énergie finale pour les transports à 30 Mtep, se ventilant de la façon suivante : transports en commun électrifiés, 3 Mtep ; voitures électriques ou hybrides, 5 Mtep (remplaçant 15 Mtep de pétrole) ; biocarburants, 15 Mtep ; et pétrole : 7 Mtep.

24. Une autre voie possible de motorisation électrique est la pile à combustible alimentée en hydrogène ; elle se traduirait par des besoins équivalents d'électricité.

COÛTS D'INVESTISSEMENT ET COÛTS TOTAUX POUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

Coûts d'investissement des principaux moyens de produire de l'électricité (en milliards d'euros par GW)

	Coût 2010	Coût 2050	Coût moyen	Commentaire
Nucléaire (EPR)		2,5		Sur la base de 5 milliards d'euros pour Flamanville 3, avec un effet d'apprentissage analogue à celui observé sur les réacteurs de 900 et 1 300 MW
Fossile avec CSC	-	2,5	2,5	Sur la base de 2 milliards d'euros le GW en moyenne pour des centrales au charbon et à cycle combiné à gaz sans CSC, majoré de 25 % pour le CSC
Éolien terrestre	1,5	1,35	1,4	Le coût des éoliennes terrestres ne baisse pratiquement pas ; on a cependant admis une légère baisse de 10 % sur la période, compte tenu d'une augmentation de 50 % à 100 % du parc éolien terrestre européen
Éolien en mer	3,3	2,65	3	On a admis une baisse de 20 % du coût, tenant compte de la forte augmentation du parc mais, simultanément, de la nécessité d'aller vers des sites plus profonds, voire des éoliennes flottantes
Solaire photovoltaïque	5	2 à 3	3,5	On applique la « loi de Moore » avec une diminution de l'investissement de 15 % pour un doublement des quantités installées en Europe

Coûts par MWh

► Nucléaire EPR de série

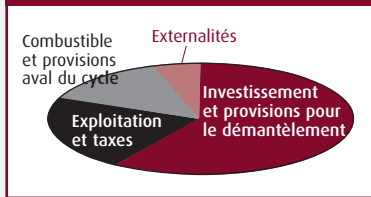
Le coût de l'électricité produite par un EPR (*Evolutionary Power Reactor*) de série est estimé en appliquant la méthodologie DGEMP-DIDEME¹. On obtient, pour un taux d'actualisation² de 8 %, un coût proche de 40 euros (2010) par

MWh se répartissant selon le graphique page suivante. Les dépenses d'investissement couvrent les approvisionnements, la construction et les intérêts intercalaires, ainsi que les provisions pour démantèlement. Les coûts d'exploitation couvrent les coûts fixes et proportionnels (y compris les taxes locales, les dépenses de R&D d'EDF et les frais

1. *Coûts de référence de la production électrique*. Paris : DGEMP (Direction générale de l'énergie et des matières premières)-DIDEME (Direction de la demande et des marchés énergétiques), décembre 2003.

2. L'actualisation consiste à transformer une valeur future en valeur actuelle, permettant ainsi de comparer des valeurs non directement comparables parce que se produisant à des dates différentes (NDLR).

Répartition du coût de l'électricité produite par un EPR, pour un taux d'actualisation de 8 %



de siège). Les dépenses de combustible couvrent l'ensemble du cycle, y compris les provisions pour le stockage des déchets. Les externalités couvrent pour l'essentiel la R&D financée par l'État, les accidents du travail, les effets potentiels sur la santé des rejets radioactifs et les conséquences d'un accident grave de très faible probabilité.

Compte tenu de la part élevée de l'investissement (60 %), le coût de l'électricité est très sensible aux conditions financières : pour un taux d'actualisation de 5 % (recommandé par le Commissariat général du Plan pour arbitrer entre les investissements publics), le coût tombe à 30 euros (2010) par MWh ; pour un taux de 11 % (correspondant à un financement privé jugé à risque), il monte à près de 50 euros (2010) par MWh.

Conformément aux recommandations de la Cour des comptes³ (et aux pratiques comptables d'EDF⁴), les dépenses lointaines (50 à 100 ans) sont actualisées à 3 %.

Sur les 5,5 euros par MWh du combustible, 1,3 euro correspond à l'uranium naturel payé 50 dollars US (34,5 euros)

le kilogramme d' U_3O_8 . Même un doublement du prix de l'uranium aurait peu d'effet sur le coût du MWh.

► Fossiles

En ordre de grandeur, on peut estimer que l'électricité produite hors CSC (capture et stockage du CO_2) avec un charbon à 3 euros le gigajoule (GJ) reviendrait à environ 55 euros par MWh, et par un gaz à 5 euros le GJ en cycle combiné, à environ 45 euros par MWh ; soit une moyenne de 50 euros par MWh. Ce chiffre est majoré de 25 % pour tenir compte de la CSC, soit un peu plus de 60 euros par MWh.

► Énergies renouvelables

Nous retenons un coût annuel (amortissement de l'investissement, coût d'exploitation) de 10 % de l'investissement. Ceci donne :

— Pour l'éolien terrestre, pour une production annuelle de 2 200 hepp (heures équivalentes pleine puissance) : 64 euros par MWh.

— Pour l'éolien en mer, pour une production annuelle de 3 500 hepp : 85 euros par MWh⁵.

— Pour le solaire photovoltaïque, pour une production annuelle de 1 000 hepp : 350 euros par MWh.

— Pour un parc éolien mi-terrestre, mi-*offshore*, on retient un coût de 75 euros par MWh.

Coût d'un super-réseau européen

Les études de l'ECF⁶ et allemande⁷ concluent que pour faire face à l'intermittence et aux répartitions géogra-

3. *Le Démantèlement des installations nucléaires et la gestion des déchets radioactifs*. Paris : Cour des comptes, synthèse du rapport public, janvier 2005.

4. GROUPE EDF. *Document de référence 2009*. Paris : EDF, avril 2010.

5. On notera que ce coût est très nettement inférieur au tarif d'achat imposé à EDF, au demeurant jugé insuffisant par les industriels.

6. ECF (European Climate Foundation). *Roadmap 2050: A Practical Guide to a Prosperous, Low-carbon Europe*. La Haye : ECF, 2010, site Internet www.roadmap2050.org.

7. *Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung*. Berlin : Projekt Nr 12/10, des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, août 2010.

phiques de l'éolien et du solaire, il faut multiplier les turbines à combustion pour faire face aux besoins locaux du réseau, et raisonner aussi au niveau européen (éolien et solaire en Espagne, éolien et hydraulique surtout en Europe du Nord) et, pour cela, construire un super-réseau (très probablement enterré et en courant continu).

Le coût des turbines à combustion et de ce super-réseau a été évalué ⁸ à environ 180 milliards d'euros lorsque les énergies renouvelables intermittentes fournissent 40 % de la production. La part de la France pourrait être

d'un sixième de ce montant, soit 30 milliards d'euros.

Comparaison du coût de deux scénarios pour la France

Si dans le scénario Négatep, on remplaçait 400 TWh nucléaires à 40 millions d'euros le TWh par 300 TWh éolien à 75 millions d'euros le TWh et 100 TWh de solaire photovoltaïque à 350 millions d'euros le TWh, le surcoût serait d'environ 40 milliards d'euros par an, venant s'ajouter aux 30 milliards d'euros précédents.

C.A., P.B.

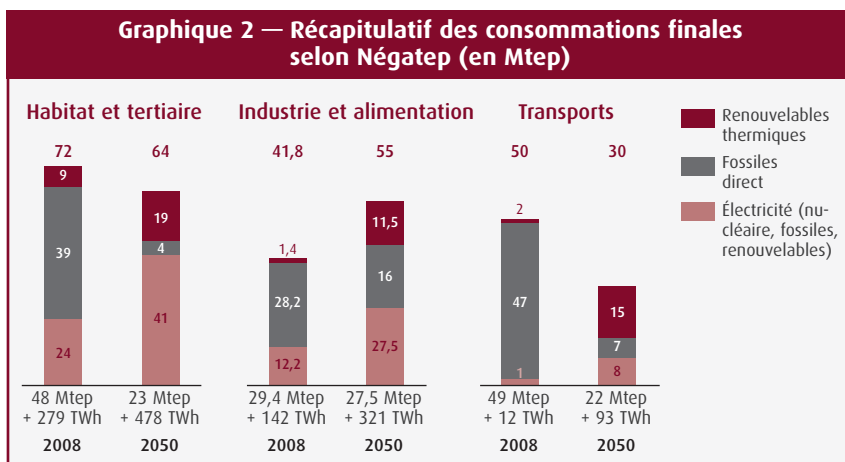
8. ACKET Claude, BACHER Pierre. *Suggestions / contributions pour la refonte de la politique énergétique européenne*. Vizille : Sauvons le climat, janvier 2011, site Internet www.sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf_files/ecf%20et%20nagatep%20-%202011.pdf.

Une approche progressive vers le facteur 4

Pour les usages fixes de l'énergie, les difficultés de mise en œuvre généralisée proviendront très globalement des problèmes logistiques et des constantes de temps très importantes, en particulier en ce qui concerne l'habitat et les habitudes de vie. Mais rien ne semble empêcher une mise en œuvre progressive, à un rythme qui dépendra effectivement du prix équivalent de l'énergie (incluant le prix affecté au CO₂), des aides publiques et des efforts de mobilisation de la profession. Le scénario Négatep retient une période d'adaptation d'ici 2020, puis un rythme annuel régulier pour tous les usages fixes (par exemple environ 500 000 logements anciens et 250 000 logements neufs entre 2020 et 2050).

Pour les usages mobiles, qu'il s'agisse de maîtrise de la demande ou du remplacement du pétrole par les biocarburants et l'électricité, le scénario Négatep retient un démarrage assez lent d'ici 2020, compte tenu d'une part des constantes de temps très importantes liées au développement des transports en commun, et d'autre part de la nécessité de progrès technico-économiques dans les biocarburants et les batteries. Le scénario retient un rythme plus rapide entre 2020 et 2050, permettant d'atteindre l'objectif visé.

En ce qui concerne la production d'électricité, il n'y a pas d'incertitude technique quant à la faisabilité du développement du nucléaire, de l'éolien et de la cogénération. Leur introduction est une question de programmation prenant en considération, pour le nucléaire, la durée de vie des centrales existantes et l'acceptation par la société ; pour la cogénération, le développement de réseaux de chaleur ; et pour l'éolien, les problèmes de coût et



d'insertion dans le réseau d'une électricité intermittente. Seul le solaire photovoltaïque reste très incertain, compte tenu de son coût. Mais les progrès rapides faits sur les capteurs solaires et leur intégration au bâti permettent d'espérer une baisse importante de ces coûts ²⁵.

Le bilan global Négatep 2050

Ces approches conduisent aux bilans d'énergie finale résumés dans le tableau 2 et le graphique 2.

Au total, en 2050, la consommation finale en Mtep (149) serait un peu inférieure à l'actuelle (162), soit en baisse de 8 %. Compte tenu de l'augmentation prévue de la population, la baisse serait de 15 % par habitant.

En remontant à l'énergie primaire ²⁶, ces résultats sont illustrés par le graphique 3.

La baisse des énergies fossiles de 134 à 37 Mtep, conséquence des économies d'énergie et de l'appel à une électricité décarbonée, conduirait à des rejets totaux de CO₂ de 112 Mt (1,7 tonne par habitant et par an).

25. Les créations de bulles spéculatives successivement en Espagne (2008), en Allemagne (2009) et en France (2010), rendues possibles par des tarifs d'achat de l'électricité photovoltaïque trop élevés, illustrent la difficulté de bien maîtriser le développement de cette voie. Négatep retient un développement maîtrisé de 0,5 GW par an.

26. Pour l'électricité, le passage de l'énergie finale à l'énergie primaire à la production tient compte de la consommation des auxiliaires, des pertes en ligne et, pour 2008 seulement, du bilan export/import (supposé équilibré en 2050) ainsi que la consommation spécifique de l'usine d'enrichissement d'uranium (supposée négligeable en 2050 avec la nouvelle technologie de centrifugation).

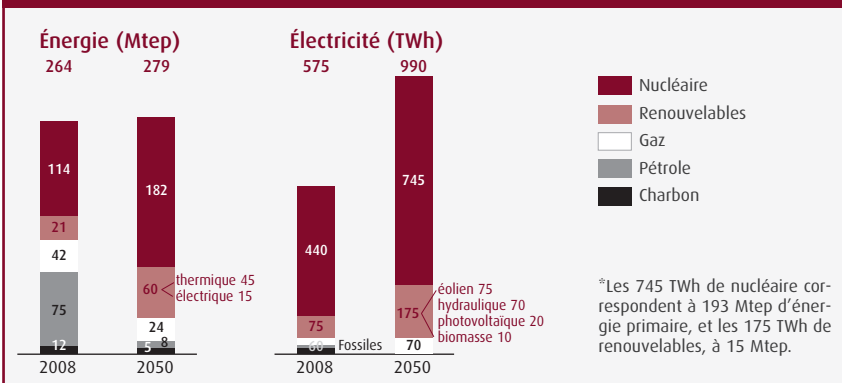
Tableau 2 — Bilan global des énergies finales selon Négatep (en Mtep)

	Combustibles fossiles			Électricité			Renouvelables thermiques		
	2008	Réf.	Nég.	2008	Réf.	Nég.	2008	Réf.	Nég.
Résidentiel-tertiaire	39	35	4	24	44	41	9	11	19
Industrie et agroalimentaire	28,2	33	16	12,2	18	27,5*	1,4	4	11,5*
Transports	47	70	7	1	2,3	8	2	7	15**
Total	114,2	138	27	37,2	64,3	76,5	12,4	22	45,5

N.B. : Réf. = scénario de référence ; Nég. = scénario Négatep.

*Dont 7,5 Mtep de biomasse et 7,5 Mtep d'électricité utilisés comme sources d'énergie pour la synthèse du biocarburant.

**Biocarburants.

Graphique 3 — Le remontage Négatep 2050 au niveau du total d'énergie primaire (en Mtep) et du vecteur électricité* (en TWh)

Deux autres approches du facteur 4 comparées à Négatep

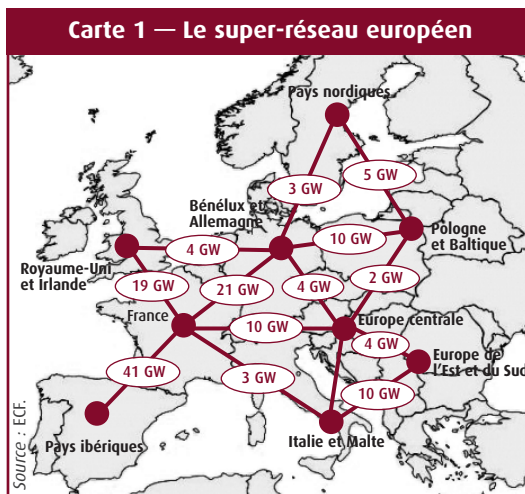
Parmi les nombreuses études publiées récemment sur les moyens de réduire les rejets de gaz à effet de serre liés à l'énergie, deux sont particulièrement intéressantes à comparer à Négatep. La première émane de l'European Climate Foundation (ECF)²⁷ ; elle s'intéresse à l'ensemble de l'Europe (Union européenne à 27, plus Suisse et Norvège) et a été présentée, entre autres, à la Commission européenne. L'autre émane d'un ins-

27. ECF (European Climate Foundation). *Roadmap 2050: A Practical Guide to a Prosperous, Low-carbon Europe*. La Haye : ECF, 2010, site Internet www.roadmap2050.org. Voir aussi ACKET Claude, BACHER Pierre. *Suggestions / contributions pour la refonte de la politique énergétique européenne*. Vizille : Sauvons le climat, janvier 2011, site Internet www.sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf_files/ecf%20et%20negatep%20-%202011.pdf.

titut d'économie allemand et a été réalisée à la demande du gouvernement allemand ²⁸.

La « Roadmap 2050 » de l'ECF

Les scénarios présentés par l'ECF visent à diviser par cinq les rejets de CO₂ en Europe, chiffre cohérent avec le facteur 4 français compte tenu des rejets actuels. L'analyse des besoins d'énergie en 2050 est proche de celle de Négatep et conduit notamment l'ECF à retenir une quasi-stabilisation de la consommation finale d'énergie et une augmentation importante des usages de l'électricité (la consommation d'électricité augmentant de 50 % environ d'ici 2050).



Pour produire cette électricité, les scénarios ECF n'écartent ni le nucléaire ni les énergies fossiles avec CSC, mais privilégient nettement les énergies éolienne et solaire, dont la part pourrait atteindre 80 %. Pour faire face au caractère intermittent de ces énergies, les scénarios misent sur un super-réseau reliant le nord et le sud de l'Europe, illustré par la carte 1.

Pour des raisons d'acceptabilité sociale, il est très vraisemblable que ce super-réseau serait en grande partie enterré, et de ce fait en courant continu. Outre le fait que ce super-réseau utiliserait la France comme plaque de transit, ce qui peut soulever quelques problèmes, le scénario avec 80 % d'électricité renouvelable nécessite des investissements supplémentaires colossaux par rapport à un scénario de référence, pouvant atteindre 40 milliards d'euros par an d'ici 2050, soit en gros le double de ce qu'il faudrait investir dans un scénario de type Négatep extrapolé à l'Europe.

Les scénarios allemands sans nucléaire

Le graphique 4 résume les consommations actuelles d'énergie primaire et de sources d'électricité en Allemagne et en France.

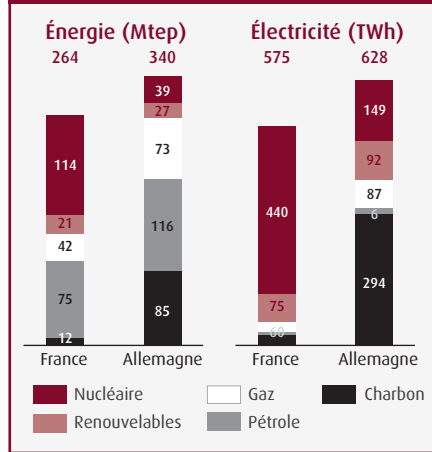
28. *Energieszenarien für ein Energiekonzept der Bundesregierung*. Berlin : Projekt Nr 12/10, des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, août 2010. Voir aussi ACKET Claude, BACHER Pierre. *Prévisions futur énergétique de l'Allemagne. Comparaison avec France Négatep*. Vizille : Sauvons le climat, 2010, site Internet www.sauvonsleclimat.org.

À ce jour, les énergies fossiles représentent 80 % des énergies primaires en Allemagne, contre 50 % en France, l'essentiel de la différence provenant de la part prépondérante du charbon dans la production d'électricité. Les rejets de gaz carbonique annuels dus à la seule production énergétique y sont de 750 millions de tonnes, soit 9,1 tonnes par habitant, contre 6,5 tonnes par habitant en France.

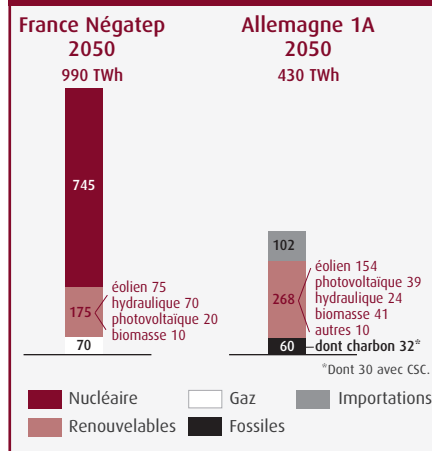
Pour 2050, les scénarios allemands proposés visent des rejets annuels de CO₂ de 138 millions de tonnes de CO₂, soit 1,9 tonne par habitant (Négatep vise 1,7 tonne par habitant en France). Pour atteindre cet objectif, les efforts à consentir dans les différents secteurs, hors production d'électricité, sont assez comparables. En revanche, ils diffèrent profondément pour le secteur électrique, en jouant à la fois sur la consommation (ramenée à 430 TWh) et sur les moyens de production. Tous les scénarios proposés pour l'Allemagne tablent sur une disparition du nucléaire, plus ou moins progressive d'ici 2050²⁹, sur une très forte diminution de la part du charbon (avec séquestration du CO₂ sur les centrales de base au charbon) et sur une très forte progression des énergies renouvelables, solaire photovoltaïque, biomasse et, surtout, éolien (graphique 5).

Mais tout ceci est insuffisant pour faire face aux besoins. Selon ces scénarios, l'Allemagne se retrouverait importatrice de plus de 100 TWh, alors qu'elle est aujourd'hui exportatrice.

Graphique 4 — Énergies primaires (brutes à la production) en Mtep, et électriques en TWh, en France et en Allemagne en 2008



Graphique 5 — France (Négatep) et Allemagne 1A 2050 : une approche totalement différente de la production électrique (en TWh)



29. Notons que suite à l'accident nucléaire de Fukushima survenu en mars 2011, le gouvernement allemand a annoncé, fin mai 2011, l'arrêt définitif du nucléaire sur son territoire d'ici 2022 — voir également l'encadré de Michel Drancourt sur ce sujet, en page 129 de ce numéro (NDLR).

Les auteurs affirment que cette électricité importée serait non carbonée, mais il est permis de s'interroger sur sa provenance (nucléaire français, solaire espagnol, hydraulique norvégien ?). Quoi qu'il en soit, les puissances appelées devraient être très supérieures au quart de la puissance installée, puisqu'une grande partie des 100 GW de puissance installée en éolien et en solaire peut disparaître brusquement. Cet appel à l'étranger repose donc sur un super-réseau de transport d'électricité tel que schématisé sur la carte 1, et sur la possibilité de le mobiliser pour faire face aux seuls besoins allemands.

Ces scénarios laissent perplexe sur plusieurs points dont deux essentiels : 1) Comment remplacer le pétrole dans les transports sans faire un large appel aux motorisations électriques et aux biocarburants dont la synthèse nécessite de grandes quantités d'énergie ? et 2) Comment mettre en place un super-réseau européen dont le plus gros bénéficiaire serait l'Allemagne et le pays le plus touché, la France ?



Négatep 2010 n'est pas une prédiction mais un scénario, reposant sur un certain nombre d'hypothèses qui peuvent ne pas se confirmer, dans les domaines tant économiques que sociétaux et technologiques.

Le domaine économique met en jeu des sommes considérables. En appliquant à la France les résultats de l'étude de l'ECF, nous obtenons pour la seule part de l'électricité, sur la période 2010-2050 :

— pour un scénario misant sur 60 % d'énergies renouvelables, un coût d'investissement de 690 milliards d'euros et un coût complet de 1 220 milliards d'euros ;

— pour un scénario proche de Négatep, un coût d'investissement de 370 milliards d'euros, soit environ 9 milliards d'euros par an, et un coût complet de 700 milliards d'euros.

Le domaine sociétal est porteur d'incertitudes majeures : comment persuader les citoyens électeurs qu'il faut, par exemple, accepter aujourd'hui une taxe carbone pour mieux anticiper les hausses futures de prix des énergies fossiles ? Comment les inciter à investir pour réduire leurs consommations et modifier leurs comportements ? Comment les convaincre que les risques et inquiétudes (dont la question des déchets et des risques d'accident) liés à l'énergie nucléaire sont bien maîtrisés ?

Le domaine technologique est lui aussi porteur d'incertitudes : les batteries permettront-elles le développement de la mobilité ? Les procédés de synthèse de biocarburants seront-ils abordables ? Le solaire photovoltaïque deviendra-t-il une source majeure d'électricité ? Saura-t-on stocker de grandes quantités d'électricité ? La plupart de ces questions justifient des efforts majeurs de recherche et développement, tant en France qu'au niveau européen. Mais on dispose d'ores et déjà, pour la plupart des usages fixes et pour la production d'électricité, des technologies nécessaires pour atteindre le facteur 4 comme présenté dans Négatep.

La révolution négaWatt est-elle réalisable ?

PROMESSES ET LIMITES D'UN SCÉNARIO DE RUPTURE

PAR BERNARD DAVID ¹

Dans le contexte de plus en plus alarmant d'épuisement des ressources énergétiques fossiles et de réchauffement du climat de notre planète, divers exercices de prospective ont été lancés ces dernières années, en vue de déterminer d'autres voies en matière de production et de consommation d'énergie. Parmi eux et concernant la France, un scénario a été rendu public en 2003 puis actualisé en 2006, le scénario négaWatt, qui propose un basculement en ce domaine, reposant sur trois leviers principaux : la sobriété énergétique, l'efficacité énergétique et le développement des énergies renouvelables.

La revue Futuribles avait sollicité les auteurs de ce scénario, tout début 2007, afin qu'ils puissent présenter les grandes lignes de ce travail original dans ces colonnes, mais malgré divers échanges et relances, y compris dans le cadre de la préparation de ce numéro spécial consacré aux problèmes énergétiques, il n'a pas été possible d'obtenir un article des responsables du scénario négaWatt. De fait, c'est Bernard David qui a aimablement accepté de rédiger, pour Futuribles, une analyse critique de ce travail.

Il présente ici les éléments fondamentaux, l'originalité mais aussi les limites du scénario négaWatt. Il souligne en particulier diverses questions essentielles visant à faire un bilan écologique global des solutions préconisées par négaWatt, afin de s'assurer qu'elles n'induisent pas de consommations ou pollutions indirectes susceptibles de contrebalancer les économies d'énergie attendues (d'où l'intérêt,

1. Chargé de prospective stratégique « corporate » au CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives). Les opinions exposées dans cet article n'engagent que son auteur et ne reflètent pas nécessairement l'analyse et la position du CEA.

en effet, des analyses en cycle de vie). Nous regrettons évidemment que l'association négaWatt n'ait pas pu présenter elle-même ses travaux et son scénario, et espérons que les questions soulevées ici par Bernard David l'inciteront à le faire dans une prochaine livraison de la revue. S.D. ■

Dans la floraison de scénarios qui voient le jour à partir de 2003, visant à réduire d'un facteur quatre les émissions de gaz à effet de serre de la France d'ici 2050, le scénario négaWatt² se distingue déjà par une approche originale (voir encadré p. 88). Après l'accident de Fukushima, il revient sur le devant de la scène, emblématique de ce besoin d'un changement dans notre rapport à l'énergie. Comment ne pas être tenté, en effet, par cette promesse d'un avenir durable, où l'on pourrait vivre mieux en s'affranchissant des ressources fossiles, sans pour autant avoir besoin de recourir au nucléaire ?

Mais, comme le dit la sagesse populaire, « la mariée n'est-elle pas trop belle ? » A-t-on bien exploré toutes les implications des changements profonds qu'induit la réalisation de ce scénario ? En particulier, est-on bien sûr d'avoir correctement balisé le chemin technologique qui nous mène à l'exploitation à grande échelle des énergies renouvelables ? Car si la ressource énergétique est bien renouvelable (soleil, vent, pluie, marées...), les équipements qu'il faut construire pour l'exploiter ne le sont pas : n'y a-t-il pas des contreparties écologiques mal évaluées à leur développement massif ?

Il n'est évidemment pas possible de laisser cette question sans réponse. Car rien ne serait pire que de remplacer les problèmes environnementaux d'aujourd'hui par d'autres, nouveaux, induits par le déploiement de solutions dont les impacts auraient été insuffisamment analysés, notamment dans leur consolidation planétaire.

Ainsi, après avoir décrit ce qui fait l'originalité et l'intérêt du scénario négaWatt, la réflexion abordera ici ce problème bien connu lorsqu'il s'agit de perspectives de substitution : comment prendre en compte correctement les problèmes nouveaux qui vont émerger des solutions de substitution, alors même que tout le discours alternatif ne peut se construire efficacement que sur la réduction des problèmes posés par les solutions existantes ?

Les fondamentaux de la démarche négaWatt

Sur ses principes, la démarche négaWatt ne peut que susciter une très large adhésion : elle prône un changement d'attitude, un basculement d'une

2. Scénario négaWatt 2006 : pour un avenir énergétique sobre, efficace et renouvelable. Paris / Mèze : association négaWatt, document de synthèse, décembre 2005, 15 p., en ligne à l'adresse www.negawatt.org/telechargement/Scenario_nW2006_Synthese_v1.o.2.pdf.

LA DÉMARCHE NÉGAWATT

« Il existe une alternative crédible à l'augmentation infinie de nos consommations d'énergie, laquelle est de toute façon impossible ! Fondée à la fois sur une approche différente et sur des techniques prouvées et sans risque, nous l'appelons "démarche négaWatt". Elle nous invite à poser un regard différent sur l'énergie, en nous interrogeant d'abord sur nos propres besoins, réels ou supposés, puis en cherchant à y répondre le plus efficacement possible et en faisant enfin appel aux sources d'énergie les moins problématiques.

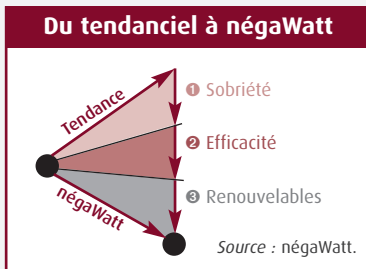
La sobriété énergétique consiste à réduire les gaspillages par des comportements rationnels, et par des choix individuels et sociétaux. Par exemple, profiter au maximum de la lumière naturelle pour s'éclairer, bien régler la

température de consigne du chauffage, privilégier les aliments de saison et produits localement, organiser intelligemment l'espace. Cette sobriété est en quelque sorte l'opposé de notre "ébrété énergétique" actuelle !

L'efficacité énergétique vise à réduire les pertes lors du fonctionnement et à l'exploitation. Le potentiel d'amélioration de nos bâtiments, de nos moyens de transport et des appareils que nous utilisons est considérable : il est possible de réduire d'un facteur 2 à 5 nos consommations d'énergie et de matières premières, à l'aide de techniques déjà largement éprouvées, avec un "temps de retour" économique souvent très raisonnable.

De façon complémentaire à ces deux actions sur la demande d'énergie, les énergies renouvelables, par définition inépuisables, bien réparties et décentralisées, ont un faible impact sur notre environnement ; elles sont les seules qui permettent de répondre durablement à nos besoins en énergie sans épuiser notre planète.

Ces trois éléments sont complémentaires et indissociables : promouvoir l'un sans se soucier des autres n'a pas de sens. »



Source : extrait de *Scénario négaWatt 2006 : pour un avenir énergétique sobre, efficace et renouvelable*. Paris / Mèze : association négaWatt, document de synthèse, décembre 2005, 15 p., en ligne à l'adresse www.negawatt.org/telechargement/Scenario nW2006_Synthese v1.0.2.pdf.

consommation insouciante vers la gestion optimale d'une ressource précieuse. Pour l'association négaWatt, en activant simultanément trois leviers — sobriété énergétique, efficacité énergétique et développement des renouvelables (voir encadré ci-dessus) —, on peut aller vers la satisfaction durable des besoins d'énergie de la France, en se passant à terme de toutes les ressources primaires non renouvelables, c'est-à-dire des combustibles fossiles et du nucléaire.

Le scénario négaWatt 2006 en est la traduction chiffrée (une version 2011 est en préparation). Il réactualise un scénario paru pour la première fois en 2003 sous cette appellation médiatique, s'appuyant lui-même sur un

travail de fond, publié en juin 2002 par Christian Couturier (association Solagro), portant sur une « analyse des bilans énergétiques nationaux, de la place de l'utilisation rationnelle de l'exergie ³ et de la part des énergies renouvelables ⁴ », travail qui avait débouché sur le scénario précurseur « APEP ».

La « révolution négaWatt » est tout entière résumée dans le passage du premier au second graphe ci-contre (graphique 1) : à gauche la référence, c'est-à-dire l'évolution estimée de la consommation en ressources primaires si on prolonge la trajectoire historique ; à droite la solution négaWatt.

Partant de la courbe enveloppe tendancielle aboutissant à plus de 3 700 térawattheures (TWh) de ressources primaires consommées en 2050 en France (à gauche), le scénario négaWatt (à droite) déduit successivement les économies en ressources non renouvelables résultant des trois modes d'action déjà énoncés : sobriété, efficacité (en distinguant celle liée à la production de celle liée à l'utilisation), enfin recours accru aux énergies renouvelables.

On tombe ainsi, en 2050, à un besoin en ressources énergétiques primaires non renouvelables inférieur à 400 TWh, que l'on satisfait entre le pétrole (206 TWh) et le gaz (167 TWh), le recours au charbon étant devenu anecdotique (5 TWh) et le nucléaire ayant disparu depuis 2040.

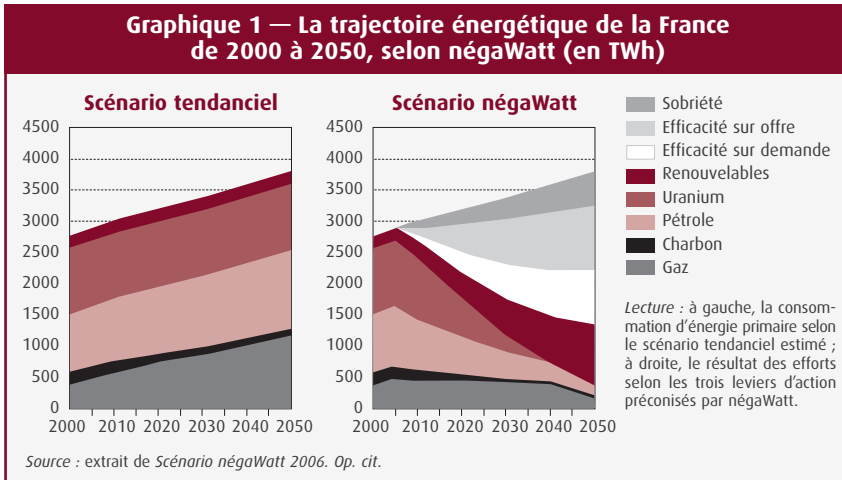
La comparaison des deux scénarios est évidemment spectaculaire.... Si spectaculaire qu'il convient d'examiner de plus près ce qui fonde ces deux scénarios.

Le scénario « tendanciel » est un scénario repoussoir. Bien plus qu'un scénario représentant réellement la tendance actuelle d'évolution, c'est un scénario de projection dans le futur de la situation passée, avec son état d'esprit, ses modes de vie, ses technologies et ses choix. La courbe enveloppe (consommation totale d'énergie primaire) ne s'infléchit pas sous l'action des politiques menées et des améliorations de l'efficacité énergétique inhérentes au renouvellement des équipements de production et de consommation, mais continue de croître linéairement, après une légère inflexion en 2010. Dans le même esprit, on a figé la contribution des renouvelables et du nucléaire pendant 50 ans, faisant porter toute l'augmentation sur les ressources fossiles, notamment le gaz dont la consommation double par rapport à celle d'aujourd'hui. On construit ainsi le graphe de gauche, destiné à interpeller le lecteur par un tableau très noir de ce qui attendrait les Français si ceux-ci ne faisaient rien.

Contrepoint du précédent, le scénario négaWatt apparaît presque irréel, irréalisable, avec sa consommation fossile réduite au quart de ce qu'elle est

3. L'exergie peut se définir comme la fraction mécanisable d'une énergie, ce qui en fait une mesure de la qualité de l'énergie ou de son niveau de dégradation, relativement à un état de référence (NDLR).

4. COUTURIER Christian. *Un autre paysage énergétique possible [APEP] : analyse des bilans énergétiques nationaux, de la place de l'utilisation rationnelle de l'exergie et de la part des énergies renouvelables*. Toulouse : association Solagro, juin 2002, en ligne à l'adresse www.solagro.org/site/im_user/109apep2.pdf.



au début du siècle, et une consommation totale d'énergie primaire inférieure à la moitié. Pourtant, cinq ans après, la feuille de route de la Commission européenne pour une économie compétitive à faible intensité de carbone à l'horizon 2050, affiche des ordres de grandeur qui, sans les atteindre, vont bien dans ce sens : division par deux des importations de pétrole et de gaz par rapport à 2005, diminution de 30 % des besoins en énergie primaire⁵. Et dans les deux cas, on atteint ou dépasse 80 % de réduction des émissions de gaz à effet de serre (ceci étant, il reste des différences notables entre les deux approches, notamment en matière de recours au nucléaire).

Mais alors, comment de telles économies en ressources primaires sont-elles encore réalisables, alors que chacun a le sentiment que, dans la vie courante, on traque déjà aujourd'hui la moindre amélioration possible ? La réponse se situe à plusieurs niveaux et mérite que l'on s'y attache, à la fois pour en montrer certains caractères originaux mais aussi pour en faire apparaître les limites.

Originalités et limites du scénario négaWatt

Tout d'abord, on remarquera que la sobriété — premier levier invoqué pour la décroissance de la consommation — n'est pas le poste le plus important. On y retrouve cette accumulation de petites choses, de petits gestes, auxquels la « chasse au gaspi », si populaire au lendemain du premier choc pétrolier, nous avait sensibilisés et que l'on a un peu oubliés depuis : éteindre les lumières inutiles, consommer moins d'eau chaude, éviter de prendre sa voiture, renouveler un peu moins souvent ses équipements, etc.

5. Feuille de route pour une économie compétitive à faible intensité de carbone à l'horizon 2050. Bruxelles : Commission européenne, communication COM(2011) 112, 8 mars 2011.

Le troisième levier, un peu plus important, concerne le développement des énergies renouvelables. Point n'est besoin de s'appesantir sur un sujet très médiatisé, chaque semaine amenant son lot d'annonces de projets nouveaux sur terre, sous terre, dans les airs, sur la mer ou sous la mer (l'éolien *offshore* étant le grand sujet du moment). La trajectoire qui sera suivie dépendra à la fois de la disponibilité des technologies, des capacités de fabrication et d'installation, de l'aptitude du réseau électrique à gérer ces sources intermittentes, et bien sûr des ressources financières mobilisables, y compris au travers des incitations publiques. Pour estimer cette trajectoire, le scénario négaWatt s'est fondé sur les résultats d'un certain nombre d'études volontaristes, secteur par secteur, effectuées par des agences spécialisées, des organismes ou des associations, en France ou à l'étranger. On peut toutefois s'interroger sur la cohérence d'un tel rythme de transformation, dans un scénario dont toute la philosophie est empreinte de modération dans l'activité économique.

Enfin, entre le premier et le troisième, le deuxième levier apparaît comme de loin le plus important. Il est même scindé en deux composantes : efficacité côté offre (991 TWh) et efficacité côté demande (873 TWh). Chacune de ces deux composantes atteint ou dépasse le niveau des deux leviers précédemment évoqués.

Côté demande, le poste d'économie qui apparaît le plus volontariste est lié à l'amélioration du bâti, par l'isolation thermique renforcée des constructions neuves, et surtout par un programme vigoureux de réhabilitation de l'ancien. En effet, contrairement aux équipements que l'on renouvelle plus vite et qui bénéficient automatiquement d'avancées, le bâti est un secteur à forte inertie (1 % de renouvellement annuel). L'intention d'en accélérer le renouvellement est évidemment louable, mais on retrouve ici une faiblesse du scénario, qui se concentre sur les économies d'énergie que l'on fera à l'usage, passant sous silence l'investissement en énergie et en matières premières qu'il faudra consentir avant même le premier kilowattheure économisé (et où les solutions de rénovation cachent parfois des surprises ; ainsi, il faut sept fois plus d'énergie pour fabriquer un cadre de fenêtre en aluminium plutôt qu'en bois⁶). Quel va être le gain net au bout du compte ? Et, comme pour le développement des renouvelables évoqué précédemment, va-t-on pouvoir réaliser ces productions massives sans stimulation excessive de l'économie, alors que tout le scénario repose sur une modération de l'activité économique ? Ou compte-t-on externaliser largement les dépenses d'énergie et de matières premières nécessaires vers d'autres pays, hors du champ du bilan (la Chine par exemple) ?

Concernant la seconde composante de ce levier d'amélioration de l'efficacité énergétique, relatif à l'offre énergétique, on observe un gain attendu encore plus spectaculaire. C'est là que se situe la vraie rupture proposée par

6. Voir le document « Teneur en énergie grise des matériaux de construction » disponible à l'adresse Internet www.info-energie-paysdelaloire.fr/docs/1-ENVELOPPE/4-Elements-de-construction/graue_energie_f.pdf.

négaWatt dans l'approche du système énergétique français. Le constat de départ en est que l'usage de l'électricité pour se chauffer est un non-sens énergétique : l'électricité est un vecteur noble, qui coûte cher (en énergie primaire) à fabriquer. Ainsi, une centrale nucléaire produit deux fois plus de chaleur, qui est perdue, que d'électricité. De même, il faut 2,3 kWh de gaz naturel dans une centrale à gaz pour produire 1 kWh de chauffage électrique chez l'utilisateur, là où la moitié du gaz aurait suffi par transformation directe dans une chaudière à haut rendement.

Le raisonnement souligne aussi que pour faire face aux pics de chauffage électrique hivernaux, l'appareil de production national doit être dimensionné très largement au-dessus du niveau des besoins permanents en utilisations « plus nobles » (au sens de l'énergétique) : éclairage, force motrice, appareils électriques... Le scénario négaWatt propose donc de limiter strictement l'utilisation de l'électricité à ces « usages nobles », et de développer la cogénération qui récupère et distribue la chaleur produite par de plus petites unités de production électrique, situées à proximité des lieux ayant des besoins en chaleur.

Ces choix très marqués du scénario négaWatt conduisent à une caractéristique atypique dans l'ensemble des scénarios publiés depuis 2003 : la part de l'électricité dans le bilan d'énergie primaire diminue entre les années 2000 et 2050, passant de 47 % à 42 %. Et comme il s'agit d'un scénario particulièrement économe, c'est au final une diminution de 40 % de la production d'électricité que l'on peut observer en 2050. Cette électricité est alors produite à 85 % par des énergies renouvelables, la part de l'éolien étant de 32 % et celle du photovoltaïque de 15 %.

Cette dernière particularité ne peut laisser indifférent : comment va-t-on pouvoir gérer un système électrique dont la moitié de la production sera soumise aux aléas du vent et de l'ensoleillement ? En fait la question est double : il faut garantir d'une part que sur la durée on sera capable de produire la quantité d'électricité nécessaire, d'autre part que l'on saura suivre en dynamique les fluctuations de la puissance appelée. Aujourd'hui, beaucoup d'experts estiment qu'au-delà de 15 % de renouvelables intermittents, la stabilité du réseau n'est pas assurée, sauf à savoir stocker l'électricité⁷. Mais si on imagine bien le stockage comme réponse aux fluctuations de demande instantanée, est-il raisonnable d'imaginer que l'on puisse stocker de quoi faire face au déficit de vent qui serait provoqué par un anticyclone durablement installé — quelques semaines, voire plus — sur tout le territoire ? Ce point, qui semble assez déterminant, fait évidemment aussi partie des questions qui seront reprises plus loin.

7. Le rapport ENCI-LowCarb présenté dans l'encadré page suivante rappelle à cet égard (p. 81) que le gestionnaire du réseau est autorisé par décret à délester des sources intermittentes soumises à obligation d'achat, lorsque leur part dans la puissance appelée dépasse 30 %. MATHY Sandrine, BIBAS Ruben et FINK Meike. *Scénarios de réduction d'émissions de gaz à effet de serre pour la France*. Projet ENCI-LowCarb (European Network engaging Civil society in Low Carbon scenarios). Paris : CIREN (Centre international de recherche sur l'environnement et le développement) et RAC-F (Réseau action climat - France), mai 2010.

NÉGAWATT : UN SCÉNARIO VRAIMENT ATYPIQUE

Depuis 2003, de multiples exercices de modélisation ont élaboré des scénarios visant à diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre en France à l'horizon 2050 (« Facteur 4 »), par rapport à la référence 1990, obligation inscrite dans la loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique (POPE) du 13 juillet 2005 pour répondre à l'objectif planétaire de maintenir le réchauffement climatique moyen en deçà de 2 °C.

Chacun de ces scénarios se recommande d'une démarche scientifique rigoureuse. Et pourtant, leurs résultats diffèrent notablement, ce qui induit une certaine perplexité, tant du citoyen que du décideur politique. Cette perplexité est d'autant plus grande que la transparence sur les hypothèses et la traçabilité des raisonnements n'est pas toujours bien assurée, et que les effets de rebouclage des effets sur les causes (rétroactions dans les modèles) semblent souvent assez mal traités. Dans ces conditions, comment construire et conduire la démarche politique nécessaire à l'atteinte de l'objectif ambitieux du « Facteur 4 » ?

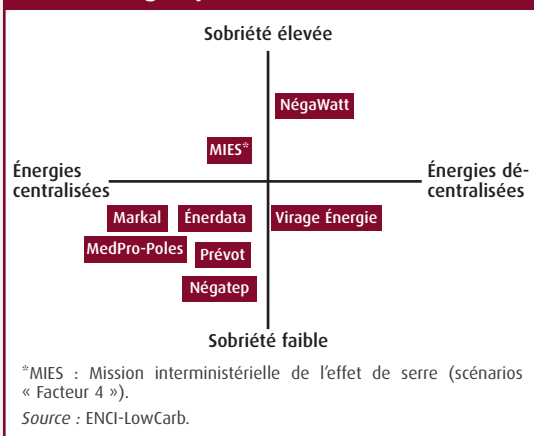
Cette question de la crédibilité des scénarios, qui amène à en effectuer une analyse comparative, fait l'objet depuis avril 2009 du projet européen ENCI-LowCarb¹, dont l'objec-

tif est de créer un réseau européen de débat entre représentants d'organisations scientifiques et citoyennes, pour dégager les solutions techniques et politiques les plus appropriées pour parvenir à une société sobre en carbone.

Les partenaires français de ce projet² ont entrepris ce travail de caractérisation des différents scénarios pour la France, travail qui a été publié en février 2010³. Le schéma reproduit ici montre un aspect particulièrement intéressant de cette caractérisation, qui positionne les scénarios selon des options techniques, qui sont aussi le reflet immédiat d'options politiques ou citoyennes sous-jacentes.

L'axe horizontal est relatif à la nature des sources d'énergie préférentiellement mobilisées. Le rapport observe que les scénarios issus de commandes institutionnelles, qui sont les plus nom-

Analyse comparative de différents scénarios énergétiques relatifs à la France



1. Projet ENCI-LowCarb (European Network engaging Civil society in Low Carbon scenarios), site Internet www.lowcarbon-societies.eu.

2. Le CIREN (Centre international de recherche sur l'environnement et le développement) et RAC-F (Réseau action climat - France).

3. MATHY Sandrine, BIBAS Ruben et FINK Meike. *Scénarios de réduction d'émissions de gaz à effet de serre pour la France*. Projet ENCI-LowCarb. Paris : CIREN et RAC-F, mai 2010.

breux, promeuvent plutôt les énergies centralisées. Les scénarios alternatifs mettent en avant les énergies décentralisées (à droite sur le schéma) : il y a dans ce choix à la fois la conviction d'un certain nombre de vertus techniques de ces énergies, et aussi celle que les énergies décentralisées offrent au citoyen une meilleure capacité d'exercer un contrôle direct sur la ressource (défiance bien connue vis-à-vis des institutions). Démêler les deux pour progresser dans le débat public nous apparaît indispensable.

Le second axe est relatif au souci de sobriété énergétique. On observe que la plupart des scénarios ne mettent pas cette préoccupation en avant, comptant avant tout sur le progrès technologique pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Le scénario négaWatt apparaît ainsi dans une position singulière. Il est d'ailleurs le seul à ne pas construire ses projections en postulant un taux de croissance *a priori* du pro-

duit intérieur brut, d'où l'on déduirait des besoins énergétiques, mais en réexaminant la question des besoins « vrais » en termes d'usages et de services énergétiques. Il est aussi le seul à séparer clairement les potentiels de progrès en matière d'efficacité énergétique et de sobriété, et à montrer qu'ils relèvent de leviers différents pour leur mise en œuvre.

Tous ces aspects font que le scénario négaWatt, à travers sa démarche, est un objet d'étude particulièrement intéressant, et à travers les questions qu'il soulève, un support précieux pour ouvrir le débat, dépasser un certain nombre de lignes de fracture entre des positions figées, et conduire à l'émergence de nouveaux paradigmes aptes à rassembler les forces vives de la nation pour mieux faire face aux défis énergétiques et environnementaux du XXI^e siècle.

B.D.

d'après les travaux ENCI-LowCarb

Que faut-il finalement retenir de l'approche négaWatt ?

Il faut saluer le mode de représentation original adopté à travers le graphe négaWatt. Il frappe les esprits en montrant bien tout ce qui sépare la consommation d'énergie primaire du service rendu par l'énergie utile. Il permet de mieux prendre conscience de l'importance des gisements d'économies possibles dans l'exploitation des ressources primaires. Il est mobilisateur par les questions qu'il suscite quant à la « réalisabilité » du scénario négaWatt.

Même s'ils sont construits par le calcul, les deux scénarios tendanciel et négaWatt sont avant tout des scénarios qualitatifs, tels qu'on les utilise pour ouvrir le débat sur les futurs possibles lors d'un exercice de prospective exploratoire. C'est-à-dire qu'ils représentent des situations-types, voire extrêmes, destinées à interpeller par leur contraste plutôt qu'à représenter des situations réellement attendues. On leur pardonne dès lors facilement un certain nombre de faiblesses, notamment liées au fait que l'on considère la France seule, comme s'il s'agissait d'un système isolé du reste du monde, et qu'un certain nombre de rebouclages économiques sont escamotés. Mais l'approche très concrète des questions posées et des solutions envisagées, qui va « parler » aux Français, est une force du scénario négaWatt, dont l'in-

térêt premier n'est pas d'être prévisionniste mais de mobiliser largement les citoyens français soucieux d'avenir.

On ne s'attachera pas trop non plus à la dérive sémantique portée par l'intitulé « scénario tendanciel », qui suggère autre chose que ce qu'il est réellement. Car, comme déjà indiqué, il s'agit plutôt d'un scénario d'immobilisme technologique et social, dont on ne voit pas bien comment il pourrait se réaliser sans une forme de retour en arrière économique.

Quant au scénario négaWatt, il est surtout à regarder pour ses trois leviers d'économies d'énergies non renouvelables, marqueurs forts de la nouvelle approche énergétique. Que les avis divergent à ce stade sur le complément nécessaire, et notamment la contribution ou non du nucléaire (ou d'un charbon rendu propre), n'est pas primordial pour avancer, sauf à se retrancher dans des positions dogmatiques, ce que l'approche négaWatt réussit globalement à éviter. Le débat qui apparaît en filigrane se situe plutôt sur un autre terrain, qui relève à la fois de l'évolution des valeurs individuelles et du rôle des États, en opposant les systèmes de production centralisés, sous le contrôle des États et de leurs opérateurs, et les systèmes décentralisés, dont chaque citoyen a l'impression qu'il a un meilleur contrôle⁸.

Au final, ce qu'il faut retenir avant tout, c'est cette approche en rupture, qui amène à ouvrir les yeux sur un certain nombre d'éléments de contexte, essentiellement d'ordre culturel, que la plupart des autres scénarios ne réexaminent pas, alors qu'ils fondent profondément notre relation à l'énergie.

Cette remise en cause salutaire, inéluctable si on ne veut pas « finir dans le mur », ne doit cependant pas nous aveugler sur les questions et problèmes nouveaux que fait émerger le scénario négaWatt, qu'il est indispensable de traiter pour savoir si et quand la « révolution négaWatt » est vraiment réalisable. Les principaux en sont repris ci-après, qui se répartissent entre quatre champs de questionnement d'ordre technique, économique et financier, politique, et environnemental.

Quatre champs d'interrogation ouverts par le scénario négaWatt

Dans le champ technique, une question particulièrement importante nous semble découler de la contradiction du scénario négaWatt avec une de

8. À cet égard, on peut renvoyer le lecteur vers les scénarios du Conseil mondial de l'énergie (CME). Baptisés du nom des animaux dont ils sont censés reprendre les traits de caractères individuels et collectifs (Léopard, Éléphant, Lion, Girafe), ils permettent d'apprécier l'efficacité des systèmes énergétiques futurs selon les niveaux de coopération / intégration entre secteurs public et privé d'une part, d'engagement des gouvernements d'autre part. Un des enseignements en est que c'est un engagement fort des gouvernements qui permet de réduire efficacement les émissions de CO₂, bien plus que la coopération / intégration entre secteurs public et privé, même à un niveau important. Voir *Choisir notre futur : scénarios de politiques énergétiques en 2050*. Londres : CME, 2007.

ses hypothèses de base, qui est de « ne compter que sur les technologies aujourd'hui disponibles ou proches de l'être de manière certaine ⁹ ». Il s'agit de la question de l'adaptation entre l'offre et la demande d'électricité, à la fois en instantané (puissance) et dans la durée (quantité d'énergie sur des périodes longues). Même si on peut dire que l'on saura sûrement un jour développer des solutions pour le stockage et la gestion intelligente (*smart grids*) de l'électricité, on ne sait pas quand ni jusqu'où on saura s'accommoder des aléas d'ensoleillement et de vent, dans un *mix* où les productions solaire et éolienne prendront une telle importance. Il s'agit là d'une incertitude majeure sur laquelle doit se concentrer la recherche et qui, au-delà du scénario négaWatt, concerne tous les scénarios qui visent un accroissement du recours aux énergies renouvelables intermittentes.

Dans le champ économique et financier, la question des investissements colossaux nécessaires pour mener de front les trois chantiers d'économie de ressources non renouvelables nous semble essentielle. Il s'agit, simultanément, d'installer massivement les nouveaux dispositifs de production d'énergie alternatifs, de moderniser le parc de production existant pour produire avec plus d'efficacité, de faire évoluer les concepts urbains et les moyens de transport, de mieux isoler tout le bâti et de renouveler les équipements trop gourmands. Un vrai travail est à faire, car on est loin de disposer de tous les ordres de grandeur, qu'il faudra ensuite mettre en perspective pour en prendre la mesure, avant même de s'interroger sur les sources de financement possibles (et aussi sur les transformations profondes du système industriel et du fonctionnement même de la société que cela induit, qui peuvent par rétroaction remettre en cause les données mêmes de la question étudiée).

Dans le champ politique, la question est de savoir par quels leviers de politique publique on va faire bouger les curseurs, de manière incitative ou de manière coercitive. Il s'agit à la fois de faire changer le rapport à l'énergie chez le consommateur, d'accompagner la décroissance des marchés en énergies fossiles qui font vivre de multiples entreprises (dont certaines très influentes), de créer les conditions du financement de l'évolution des parcs de production et d'utilisation. Par ailleurs, ce sont les personnes les plus fragiles, aux ressources les plus faibles, qui seront les plus touchées par l'obligation de respecter des normes nouvelles entraînant des mises à niveau (logements mal isolés, voitures anciennes...). Bousculer les habitudes et les positions établies, tout cela en annonçant que cela va forcément coûter de l'argent et affecter les plus faibles, n'est pas ce que les politiques préfèrent...

Enfin, et ce n'est pas la moindre question, il s'agit de faire le vrai bilan écologique du déploiement à grande échelle des solutions alternatives préconisées. Les solutions alternatives disposent toujours au départ d'un capital de sympathie, basé sur l'attrait de la nouveauté et sur un parfum de liberté reconquise vis-à-vis de l'ordre établi et de ses opérateurs. Cela a été le cas pour les premières éoliennes. Puis leur développement s'est accompagné d'une prise de conscience de nuisances induites au plan local. Aujourd'hui,

9. Scénario négaWatt 2006. *Op. cit.*

on commence à s'interroger sur le bouclage macroécologique de leur cycle de vie : certains ne disent-ils pas qu'au rythme actuel, on aura épuisé dans cinq ans toutes les ressources de la Terre en néodyme pour en réaliser les génératrices ? Bien sûr, on pourra trouver d'autres terres rares pour réaliser les aimants des génératrices, on pourra aussi réaliser des génératrices sans aimants permanents. Mais le problème n'est-il pas tout simplement de ne pas remplacer une pénurie annoncée d'hydrocarbures par une autre pénurie à venir, que l'on contournera en faisant appel à encore une autre ressource qui s'épuisera elle aussi ?

Pour un vrai bilan écologique global des solutions de remplacement

La dernière interrogation soulevée nous semble particulièrement déterminante dans la recherche de cette voie du « non-regret » que les promoteurs de la démarche négaWatt appellent de leurs vœux. Car le problème fondamental, c'est que notre Terre est finie et qu'en dehors des systèmes vivants qui transforment l'énergie d'origine solaire naturellement et à la volée, toute exploitation économique des énergies renouvelables nécessite des équipements qu'il faut d'abord construire, puis entretenir, et enfin déconstruire.

Ainsi, lorsque l'on parle de la merveilleuse faculté des panneaux solaires de transformer directement la lumière en électricité, sans pollution ni CO₂, on oublie qu'il a fallu les fabriquer et qu'aujourd'hui, pour cela, on pollue des nappes phréatiques à grande échelle en Chine. Par ailleurs, combien d'énergie a-t-on réellement utilisé pour les fabriquer, cette « énergie grise » que l'on oublie souvent de comptabiliser ? Combien de CO₂ a-t-on émis lors de cette fabrication et combien de temps faudra-t-il pour rembourser cette dépense initiale (voir à cet égard l'exemple très illustratif donné dans l'encadré ci-contre) ? La fin de cycle (déconstruction, recyclage, gestion des déchets ultimes) pose évidemment le même type de question.

Cette question des coûts cachés dans les phases de pré- et post-utilisation est centrale dès lors que l'on s'intéresse à des solutions de remplacement. D'ailleurs, la Commission européenne, qui planche actuellement sur un nouveau plan d'action stratégique pour les nanotechnologies (SNAP), en a bien pris conscience par les résultats d'une étude parue fin 2010¹⁰, qui l'amènent à attacher une importance nouvelle aux analyses de cycles de vie (voir l'encadré suivant).

La découverte d'une face probablement plus sombre du développement des énergies renouvelables doit-elle pour autant en occulter la face claire, promesse d'un avenir plus durable ? Bien sûr que non, car un recours crois-

10. Voir à ce sujet DHINGRA Rajive, NAIDU Sasikumar, UPRETI Girish et SAWHNEY Rapinder. « Sustainable Nanotechnology: Through Green Methods and Life-Cycle Thinking ». *Sustainability*, vol. 2, 2010, pp. 3323-3338.

BILAN CO₂ D'UNE FILIÈRE DE REMPLACEMENT : TOUT DÉPEND DU CONTEXTE

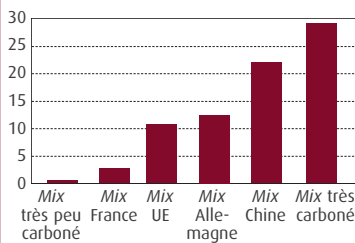
Faire un bilan complet du gain en émissions de CO₂, lors du remplacement d'une solution énergétique par une autre, suppose de s'intéresser à deux aspects distincts : d'une part le coût en CO₂ de la technologie de remplacement envisagée, tout au long de son cycle de vie ; d'autre part le coût évité en CO₂, c'est-à-dire le coût en CO₂ qu'aurait eu la technologie que l'on remplace. Suivant le contenu du *mix* énergétique du pays producteur et du pays utilisateur, les chiffres peuvent varier dans une plage très large, comme l'illustre l'exemple suivant, tiré d'une étude récente de l'Institut de technico-économie des systèmes énergétiques (I-tésé)¹.

Il s'agit du temps de retour CO₂ de modules photovoltaïques installés à Paris, suivant le pays où ils ont été fabriqués. Le « temps de retour » désigne la durée de fonctionnement au bout de laquelle on commence à être gagnant par rapport à la solution que l'on a remplacée. On ne considère ici que la

fabrication du module photovoltaïque lui-même, selon le procédé Siemens de purification du silicium, et non du panneau complet assemblé, installé et raccordé (ce qui ajoute des coûts en CO₂ non négligeables). D'après cette étude, le temps de retour CO₂ d'un module photovoltaïque fabriqué en France est inférieur à trois ans, là où celui d'un module produit avec le *mix* électrique chinois (très carboné, notamment du fait de l'utilisation importante de charbon pour produire de l'électricité) dépasse 20 ans (voir graphique).

Dans un pays au *mix* électrique plus carboné, comme l'Allemagne (427 grammes de CO₂ par kilowattheure produit, à comparer aux 90 grammes du *mix* français), la barre est évidemment moins haute (à ensoleillement équivalent à celui de Paris) : en installant en Allemagne un module fabriqué avec le *mix* électrique chinois, on commence à améliorer le bilan carbone au bout de cinq ans de fonctionnement. Et un panneau fabriqué en France y devient intéressant au bout de six mois !

Temps de retour en CO₂ selon le *mix* électrique utilisé pour le procédé de fabrication (Siemens) d'un module photovoltaïque Si-c installé à Paris (en années)



Source : I-tésé.

Les travaux de l'I-tésé soulignent ainsi une des synergies que l'on voit apparaître aujourd'hui entre le nucléaire et les énergies renouvelables : le nucléaire permet de produire des équipements pour les énergies renouvelables incorporant très peu de CO₂. Dans un contexte d'efforts mondiaux pour minimiser le réchauffement climatique, il s'agit d'un atout important pour la France, qui lui permet de conjuguer intérêt économique propre et utilité planétaire, en développant des filières de production françaises pour les énergies renouvelables.

B.D.,
d'après les travaux de l'I-tésé

1. THAIS Françoise. *Bilans énergétique et environnemental (vis-à-vis des émissions de CO₂) de la filière photovoltaïque Si-c. Mise en évidence de l'influence du lieu de fabrication/installation des modules*. Gif-sur-Yvette : CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) / I-tésé, rapport RT 2011-03.

sant à des alternatives aux hydrocarbures est inéluctable. Mais il est grand temps de disposer des données nécessaires au niveau « micro », de les consolider dans une vision « macro », à la fois pour optimiser l'utilisation des ressources globales de la Terre et pour identifier les limitations auxquelles la R&D (recherche-développement) doit contribuer à trouver des solutions.

Au niveau micro, il faut avec précision faire l'inventaire de tout ce que l'on incorpore dans chaque dispositif producteur d'électricité tout au long de son cycle de vie, tant en ressources naturelles qu'en énergie, ou encore en pollution ou autres désordres de l'environnement. Ensuite, il faut consolider tout cela au niveau macro. Si on reprend l'exemple du solaire photovoltaïque : pour arriver aux puissances installées préconisées dans le scénario négaWatt, que deviennent les totaux en matières premières utilisées et en atteintes à l'environnement ? La Terre dispose-t-elle d'assez de ressources pour généraliser le scénario au niveau mondial ? Où vont se situer les points de blocage ?

Des données partielles existent au niveau micro. Elles sont dispersées et ceux qui les détiennent n'ont pas toujours intérêt à ce qu'elles soient

ANALYSE DU CYCLE DE VIE ET NANOTECHNOLOGIES DURABLES

Pour garantir des applications nanotechnologiques durables en Europe, la Commission européenne met en avant, dans un rapport récent ¹, l'analyse du cycle de vie comme outil d'aide à la décision : « Une approche combinant une analyse du cycle de vie et une analyse des risques pourrait permettre de se faire une idée plus précise des effets potentiels des produits contenant des nanomatériaux sur l'environnement et la santé. [...] »

« Cette idée consistant à analyser l'ensemble du cycle de vie pour garantir la durabilité des nanotechnologies s'appuie sur les résultats d'une étude scientifique publiée vers la fin de l'année 2010 ². [...] »

« Selon l'étude, les avantages des matériaux nanostructurés se situent généralement au niveau de leur utilisation,

tandis que les problèmes environnementaux et sanitaires qui se posent à d'autres étapes du cycle de vie tendent à être négligés. L'analyse du cycle de vie (ACV) est un outil très précieux pour évaluer les incidences environnementales d'un produit tout au long de sa vie, de la transformation des matières premières à son élimination, en passant par sa fabrication et son utilisation. [...] »

« Par exemple, dans le cas d'éléments de carrosserie de véhicules automobiles, les matériaux ultralégers fondés sur les nanotechnologies rendent les véhicules plus économes en carburant. Cependant, l'ACV révèle que l'énergie consommée pour leur extraction, leur transformation et leur production dépasse nettement les économies générées par la diminution de la consommation de carburant. »

B.D.

1. « La Commission européenne met l'accent sur l'analyse du cycle de vie pour garantir des applications nanotechnologiques durables en Europe ». Site Internet de la Commission européenne : http://ec.europa.eu/environment/etap/inaction/policynews/702_fr.html (lien valide début juin 2011).

2. DHINGRA Rajive, NAIDU Sasikumar, UPRETI Girish et SAWHNEY Rapinder. « Sustainable Nanotechnology: Through Green Methods and Life-Cycle Thinking ». *Sustainability*, vol. 2, 2010, pp. 3323-3338 (NDLR).

connues. Quant à l'articulation micro / macro, elle est encore plus rarement abordée, alors qu'elle est la clef du passage de la science à l'action politique. N'y a-t-il pas là un champ de connaissances à investir d'urgence ? Ne va-t-on pas faire apparaître des points durs insoupçonnés et des questions inédites ? Tout cela ne serait-il pas de nature à renouveler la vision que l'on a des priorités d'action, tant pour la recherche que pour les politiques publiques d'accompagnement ?

Perspectives : la feuille de route tracée par cette analyse du scénario négaWatt

Le changement d'attitude vis-à-vis de l'énergie, dont les promoteurs du scénario négaWatt sont les ardents défenseurs, est une impérieuse nécessité. L'approche négaWatt nous invite à revisiter nos modes de vie, pour refonder notre société sur des bases énergétiques nouvelles, qui soient durables. Il s'agit d'une révolution des mentalités avant d'être une révolution des solutions techniques. Les deux aspects sont évidemment mêlés, mais il ne faut pas les confondre. C'est d'ailleurs toute la difficulté rencontrée lors de grands débats comme ceux du Grenelle de l'environnement¹¹, dont la dynamique apparaît néanmoins aujourd'hui bien enclenchée¹².

La « révolution négaWatt » met l'accent sur des valeurs et attitudes d'économie d'énergie qui semblent incontournables dans un monde de neuf milliards d'habitants, mais elle est hautement problématique au plan des trajectoires et solutions techniques préconisées aujourd'hui. La voie du non-regret, si chère aux promoteurs de négaWatt, est donc à construire avec d'un côté l'ardente obligation de sortir de la logique énergivore et carbonée d'aujourd'hui, de l'autre celle de promouvoir des solutions à la viabilité et la durabilité éprouvées aux plans technique, économique et financier, politique, et bien entendu environnemental.

Le croisement de multiples expertises scientifiques, techniques et sociétales est nécessaire pour construire solidement ces solutions durables. Il est urgent que les acteurs échangent plus leurs savoirs, car sur des questions systémiques comme celle de l'énergie, les rebouclages se font à tous les niveaux et peuvent rendre totalement caducs les raisonnements disciplinaires les mieux fondés. Le scénario négaWatt — comme beaucoup d'autres d'ailleurs¹³ — présente à cet égard un certain nombre d'insuffisances, aux-

11. Processus participatif lancé en 2007 en France, visant à prendre des décisions de long terme en matière d'environnement et de développement durable, ayant notamment débouché sur deux séries de lois (Grenelle I en juin 2009, et Grenelle II en juillet 2010) (NDLR).

12. Le *Rapport d'évaluation du Grenelle de l'environnement* (Paris : La documentation Française, octobre 2010) souligne que la « dynamique [du Grenelle de l'environnement est] en marche » avec plus des trois quarts des 268 engagements pris en octobre 2007 aujourd'hui « réalisés [ou] en cours de réalisation ».

13. Voir à cet égard ce que dit le rapport ENCI-LowCarb déjà cité, après avoir analysé une dizaine de scénarios.

quelles il est indispensable de remédier pour réduire les incohérences ou impossibilités qui le rendent non crédible, notamment aux yeux des macroéconomistes.

Un des piliers technologiques du scénario négaWatt est le recours accru aux énergies renouvelables pour alimenter le système électrique. Les sources intermittentes (vent, soleil) contribuent pour près de la moitié au *mix* électrique envisagé en 2050, dans une perspective de « tout-renouvelable » avant la fin du siècle. Si on peut imaginer qu'un jour on saura stocker l'électricité ou piloter intelligemment les appareils pour suivre les fluctuations de la demande à court terme (pointes journalières par exemple), comment pourrait-on gérer un déficit durable de production lié à un événement ou un changement climatique imprévu ? Une fois la réserve épuisée, que fera-t-on si on ne dispose pas d'un moyen de production garantissant par tout temps la base minimale pour assurer les fonctions vitales de la société ?

Enfin, le dernier point concerne le bilan écologique global des énergies renouvelables. Ce point nous semble particulièrement déterminant parce qu'il renvoie, dans l'esprit de beaucoup de nos concitoyens, à une représentation erronée de ce qui est renouvelable. Il nous apparaît indispensable que l'ensemble des parties prenantes prennent bien conscience que seuls les flux de lumière, d'air ou d'eau sont renouvelables, et pas les dispositifs matériels nécessaires pour les capter. Sur ces dispositifs et leurs cycles de vie, il reste des données indispensables à rassembler et à mettre en débat, pour s'assurer qu'ils sont bien durables dans les conditions dans lesquelles nous les fabriquons, utilisons et remplaçons. Pour cela, la recherche est plus que jamais nécessaire, à la fois pour caractériser les filières technologiques et pour rendre possible demain ce qui ne l'est pas encore aujourd'hui.

Toutes ces questions nous tracent la « feuille de route » de ce qu'il reste à faire pour réussir une révolution des systèmes et des usages énergétiques devenue incontournable au plan mondial, même si le futur que nous construisons ne sera sans doute pas celui que nous décrit le scénario négaWatt pour la France. Chercheurs, politiques, citoyens, entreprises : mettons-nous au travail !

UN AUTRE REGARD SUR NÉGAWATT

Le scénario de négaWatt prône la maîtrise et la sobriété énergétiques mais n'appelle pas à la décroissance économique ; ces deux éléments ne sont pas liés. Ainsi, Dominique Bourg a montré par l'exemple, dans les colonnes de *Futuribles* ¹, que des entreprises peuvent vendre un service sur la base d'un produit (des kilomètres, une température garantie, des copies...) sans vendre le produit, et ainsi gagner davantage d'argent tout en faisant des économies de matière première et d'énergie.

L'article de Bernard David pose de très bonnes questions sur la faisabilité et les limites du scénario négaWatt. Pour faire court, nous n'en aborderons que deux, en les mettant au regard d'une voie alternative à négaWatt, le recours, par exemple, à l'énergie nucléaire.

Sur l'ampleur des investissements

Dans le champ économique et financier, rappelons que la France se trouve dans une période économique difficile, marquée par une « crise de la dette ». Mais ceci n'a pas empêché l'État de lancer un grand emprunt, de prévoir un grand métro automatique autour de Paris, de nouvelles lignes de trains à grande vitesse... Un grand emprunt permettrait de rénover thermiquement le parc de bâtiments anciens (utile quel que soit le scénario de production énergétique), d'investir dans les énergies renouvelables puis d'adapter le réseau électrique pour plus de flexibilité. Il pourrait commencer à être remboursé dès l'année $n + 1$ via les économies

d'énergie, en maintenant le budget énergie des usagers. En effet, le coût d'usage des énergies renouvelables est faible au regard des alternatives ; celui de leur déconstruction ² doit être regardé de plus près mais ne présente pas de risque spécifique pour un bouclage économique complet.

Sur les effets induits

Dans le cas du nucléaire, outre l'investissement et le coût d'usage, il y a le coût de stockage et de gardiennage des déchets pendant des milliers (voire des centaines de milliers) d'années, le coût du démantèlement qui prend plus d'une dizaine d'années, au minimum, et coûte très cher ³. Ces coûts complets sur l'intégralité du cycle de vie du nucléaire sont peu évalués, probablement parce qu'ils seront à la charge des générations futures qui, en revanche, ne bénéficieront pas du service. La différence majeure avec une dette léguée aux suivants étant que la radioactivité, contrairement à une monnaie, a peu de chances d'être dévaluée par la seule volonté humaine.

De même s'agissant de l'énergie « grise ⁴ » et du bilan écologique complet : quel est le bilan CO₂ du démantèlement et surtout du confinement des déchets nucléaires qu'il faudra probablement rénover plusieurs fois sur la durée de vie de ces déchets, et quelle quantité d'énergie faudra-t-il pour les garder et les sécuriser ?

Véronique Lamblin,
Futuribles ⁵

1. BOURG Dominique, BUCLET Nicolas. « L'économie de fonctionnalité. Changer la consommation dans le sens du développement durable ». *Futuribles*, n° 313 novembre 2005, pp. 27-38.

2. Démontage des installations et gestion des matériaux ou de leur recyclage.

3. Des centaines de millions d'euros pour une seule centrale, selon un article de Horst Günther paru dans *Stern* (Hambourg) et repris dans *Courrier International*, n° 1068, du 21 au 27 avril 2011, p. 20, sous le titre « Démantèlement : tout doit disparaître ! »).

4. Les consommations indirectes d'énergie induites.

5. Voir également LAMBLIN Véronique. « Un scénario énergétique alternatif pour la France ». *Futuribles*, n° 316, février 2006, pp. 76-78.

ABONNEZ-VOUS AU PACK REVUE + WEB



Revue



et Web

Tarif : 299 € TTC France (266,48 € HT) par an*

*Pour une livraison en France métropolitaine. Autres pays, outre-mer 299 €

La revue *Futuribles* chez vous chaque mois (11 numéros par an)

L'accès illimité à toutes les archives en ligne (1 à 10 postes)

➤ **Connexion au choix avec identifiant (adresse électronique) et mot de passe, ou par accès IP**

➤ **Accès au numéro en cours
+ archives depuis 2005 en texte intégral**

www.futuribles.com

BULLETIN D'ABONNEMENT

Nom - Prénom _____
Société _____ N° de TVA _____
Adresse _____
Code Postal - Ville _____
Pays _____ Tél. _____
E-mail _____

Je m'abonne pour un an au *pack* revue + *Web* de *Futuribles*
(revue + revue en ligne avec numéro en cours et archives depuis 2005,
texte intégral, 1 à 10 postes) et règle 299 € par :

Chèque à l'ordre de Futuribles

Visa Am. Express N° _____ Exp. fin _____
Cryptogramme figurant sur votre carte _____

Virement : CIC Paris Bac, 2 bd Raspail, F-75007 Paris
RIB : 30066-10041-00010573801-16 / BIC : CMCIFRPP
IBAN : FR76-3006-6100-4100-0105-7380-116

Sur facture

Date : _____ Signature : _____

Offre valable jusqu'au 31/12/2011

À photocopier et à retourner à Benjamin Privey - Futuribles - 47, rue de Babylone - F-75007 Paris
Tél. 33 (0)1 53 63 37 73 - Fax 33 (0)1 42 22 65 54 - E-mail : bprivey@futuribles.com

Prospective Agriculture énergie 2030

COMMENT L'AGRICULTURE S'ADAPTERA-T-ELLE
AUX FUTURS DÉFIS ÉNERGÉTIQUES ?

PAR CÉLINE LAISNEY, FABIENNE PORTET ET JULIEN VERT ¹

L'agriculture, comme toutes les autres activités économiques, consomme de l'énergie ; mais elle est aussi, et de plus en plus, productrice d'énergie (au travers, par exemple, de la biomasse ou des biocarburants). Dans un contexte énergétique en pleine évolution en raison de l'épuisement des ressources fossiles et de la lutte contre le réchauffement climatique, il est donc essentiel de pouvoir envisager la façon dont le secteur agricole et ses acteurs vont appréhender les défis liés à l'énergie. C'est pourquoi le Centre d'études et de prospective du ministère français en charge de l'Agriculture a mené, en 2009-2010, une large étude prospective, « Agriculture énergie 2030 », dont Céline Laisney, Fabienne Portet et Julien Vert nous livrent ici les principaux enseignements.

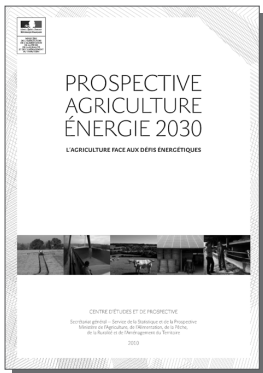
Après un état des lieux dans lequel ils précisent les liens entre agriculture et énergie en France, et soulignent les différents enjeux en ce domaine à moyen-long terme, les auteurs présentent les grandes lignes de cette prospective et les quatre scénarios qui en ont résulté. Ces quatre scénarios, contrastés et chiffrés, décrivent les évolutions probables de l'agriculture française dans différents contextes énergétiques à l'horizon 2030 : « Territorialisation et sobriété face à la crise », « Agriculture duale et réalisme énergétique », « Agriculture-santé sans contrainte énergétique forte » et « Agriculture écologique et maîtrise de l'énergie ». Mettant en exergue les difficultés à venir, mais aussi les opportunités à saisir dans le sec-

1. Les auteurs font tous partie du Centre d'études et de prospective (CEP) du ministère français de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire (MAAPRAT) (voir encadré *infra*). Cet article ne représente pas nécessairement les positions officielles du MAAPRAT ; il n'engage que ses auteurs.

teur agricole, ces scénarios donnent aux pouvoirs publics de nouveaux éléments pour alimenter leur stratégie en matière agricole, montrent les marges de manœuvre existantes, permettent de dégager des objectifs généraux et les différents leviers d'action possibles selon les axes qui seront privilégiés. S.D. ■

L'énergie est souvent considérée comme un enjeu conjoncturel pour l'agriculture, alors qu'elle est en réalité une question d'avenir majeure de par ses conséquences économiques pour les exploitations, ses liens avec les questions environnementales et climatiques, et son influence sur l'organisation des filières et l'aménagement des territoires. L'évolution du contexte énergétique mondial est incertaine à moyen terme, et les capacités d'adaptation du secteur agricole français seront stratégiques pour le maintien d'une agriculture performante et durable. Les exploitations agricoles sont en effet dépendantes de sources extérieures d'approvisionnement (pétrole, gaz) mais aussi — c'est moins connu — d'énergies indirectes à travers les engrais minéraux ou les tourteaux importés pour l'alimentation animale.

Pilotée par le Centre d'études et de prospective du ministère français chargé de l'Agriculture, la prospective « Agriculture énergie 2030 » a reposé sur les travaux d'un groupe d'experts issus d'organismes variés et s'est déroulée d'avril 2009 à juin 2010. Elle permet d'abord de diagnostiquer les liens entre agriculture et énergie en France, et comprend quatre scénarios prospectifs décrivant les évolutions probables de l'agriculture française dans différents contextes énergétiques à l'horizon 2030.



En aidant à prendre conscience des difficultés et problèmes futurs, ou inversement des opportunités à saisir, les scénarios alimentent l'analyse stratégique qui conclut l'exercice et permet de dégager des objectifs généraux et des leviers pour l'action publique. Ces leviers concernent l'efficacité énergétique à l'échelle des exploitations et des bassins de production, des énergies renouvelables et, de manière transversale, le système de détection et de diffusion de l'innovation en agriculture.

Le rapport final (qui comporte dans sa version électronique des annexes détaillées ainsi que de nombreux liens hypertexte)² et sa synthèse, en français et en anglais, sont disponibles sur le site Internet du Centre d'études et de prospective : <http://agriculture.gouv.fr/rapport-final-agriculture-energie>.

2. *Prospective Agriculture énergie 2030. L'agriculture face aux défis énergétiques*. Paris : CEP / MAAPRAT, 2010.

LE CENTRE D'ÉTUDES ET DE PROSPECTIVE

Dans un monde complexe et globalisé, il est plus que jamais nécessaire de connaître et d'anticiper pour piloter les affaires publiques autrement qu'en réaction à des crises. C'est la raison pour laquelle les fonctions d'étude et de prospective du ministère français de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire ont été renforcées, avec la création fin 2009 d'un Centre d'études et de prospective (CEP).

Ce dernier doit fournir des analyses et des outils de pilotage sur des problèmes publics complexes d'envergure nationale et internationale : régulation des marchés et des prix, réforme de la politique agricole commune européenne, alimentation, développement durable, risques et assurances agricoles,

pêche, nouvelles ruralités, pays émergents, mondialisation...

Le CEP remplit des rôles à la fois d'alerte (veille, faits porteurs d'avenir), de sensibilisation (diffusion de l'attitude prospective et évaluative), d'appui (conseil, expertise, assistance) et d'animation (mobilisation de relais internes et externes, conduite de projets, montage d'événements publics).

Parmi ses fonctions transversales, le CEP est responsable de la programmation des crédits d'études du ministère et il assure le secrétariat général du Conseil stratégique de l'agriculture et de l'agro-industrie durables (CSAAD), organe pluridisciplinaire de réflexion placé auprès du ministre et devant éclairer la définition des orientations stratégiques du ministère.

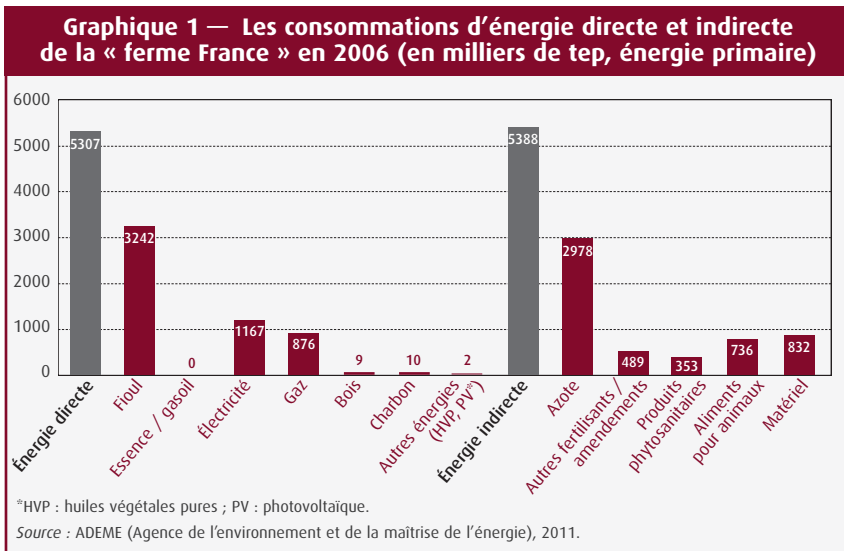
Contact : Bruno Héroult • CEP • Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du territoire • 12 rue Rol-Tanguy • TSA 70007 • F-93555 Montreuil-sous-Bois cedex • Tél. 33 (0)1 49 55 57 43 • E-mail bruno.herault@agriculture.gouv.fr.

État des lieux : les enjeux énergétiques pour l'agriculture française

Sans être toujours considéré comme prioritaire, le thème de l'énergie est pourtant régulièrement d'actualité dans le secteur agricole, sous des angles variés. Tout d'abord, l'agriculture est fortement consommatrice d'énergies fossiles, par conséquent toute augmentation du prix du pétrole se répercute sur ses coûts de production. Avec 5,3 Mtep (millions de tonnes équivalent pétrole) consommées en 2009³, le secteur représente 3 % de la consommation totale française en énergie directe (principalement du fioul pour alimenter les tracteurs). La performance énergétique des exploitations s'améliore depuis 40 ans (entre 1970 et 2007, le rapport entre l'énergie consommée et la production a diminué de 2 % par an) sous l'effet d'une forte croissance de la production et du progrès technique.

À ces consommations directes, il faut ajouter les énergies indirectes mobilisées en agriculture : 5,4 Mtep sont consommées pour la fabrication et le

3. CGDD / SOeS (Commissariat général au développement durable / Service de l'observation et des statistiques). *Bilan énergétique de la France pour 2009*. Paris : ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, 2010.



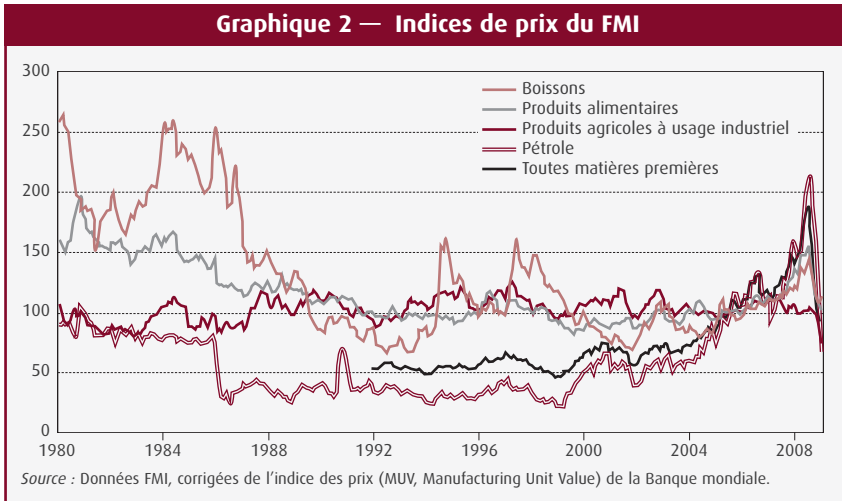
transport des intrants ⁴, principalement les engrais azotés, le matériel et les aliments concentrés pour les animaux. Au total, on estime que le secteur agricole consomme 11 Mtep par an (voir graphique 1), soit une intensité énergétique d'environ 0,37 tep par hectare. L'utilisation d'azote minéral a presque doublé entre 1970 et 1990, puis s'est stabilisée. Concernant l'alimentation animale, la part des concentrés est relativement stable depuis les années 1990 ⁵.

La part des consommations énergétiques totales dans les coûts de production des exploitations varie beaucoup selon leur orientation technique (céréales, élevage, maraîchage, etc.), mais pour certaines filières comme les serres horticoles et maraîchères, la maîtrise des consommations d'énergie constitue un facteur clef de compétitivité.

Les fluctuations du prix des énergies fossiles se répercutent donc assez fortement sur les coûts de production des exploitations agricoles. Entre 2006 et 2008, par exemple, les prix des consommations intermédiaires ont très fortement augmenté sous l'effet de la hausse des prix du pétrole (+ 62 % pour les engrais, + 46 % pour les carburants et lubrifiants, et + 38 % pour l'alimentation animale achetée). L'énergie est donc un enjeu économique important pour les exploitations (voir graphique 2). Le rapport entre prix de l'énergie et prix de vente est déterminant pour les revenus des agriculteurs.

4. En agriculture, on appelle « intrants » les différents produits apportés sur l'exploitation pour entrer dans les processus de production. Il s'agit principalement des engrais et amendements, des produits phytosanitaires, des énergies, ainsi que des semences et de l'alimentation animale lorsqu'elles ne sont pas produites sur l'exploitation.

5. Contrairement à l'énergie directe, les consommations d'énergie indirecte sont le plus souvent estimées.



En 2010, la forte hausse des prix agricoles a compensé celle des prix des intrants, si bien que le revenu réel agricole par actif a augmenté de 12,3 % par rapport à 2009 dans l'Union européenne⁶. Mais une situation différente, avec « effet de ciseaux » entre des prix agricoles bas et des prix de l'énergie élevés, ne peut être exclue à l'avenir.

De manière plus indirecte, l'évolution des prix de l'énergie fossile peut avoir des impacts sur l'organisation des filières et la localisation des activités agricoles. L'agriculture est fortement insérée dans les échanges marchands internationaux et communautaires ; l'évolution des coûts de transport, sensibles à ceux du pétrole, peut donc avoir des conséquences importantes sur l'organisation du secteur. Des coûts de transport élevés agissent par exemple comme un facteur de concentration des exploitations à proximité des ports pour les marchés à l'export, ou des zones de consommation (agriculture péri-urbaine). Malgré la réduction des distances parcourues, les circuits courts d'approvisionnement alimentaire, qui connaissent un regain significatif, n'ont pas toujours une efficacité énergétique optimale. Par ailleurs, l'évolution vers des modèles d'agriculture plus durables et économes en énergie pourrait se traduire par une diversification des activités de production (présence de cultures variées et d'élevages sur un même territoire) et par des opportunités de développement pour de nouvelles filières d'approvisionnement locales, notamment pour les engrais et l'alimentation animale.

La thématique de l'énergie recoupe en outre d'autres enjeux environnementaux. L'agriculture est en effet en mesure de participer aux objectifs de lutte contre le réchauffement climatique en réduisant ses émissions de gaz à effet de serre, en séquestrant du carbone dans les sols mais aussi en pro-

6. « Le revenu agricole réel par actif en hausse de 12,3 % dans l'UE27 ». Communiqué de presse Eurostat, 20 décembre 2010.

LES BIOCARBURANTS

Deux types de biocarburants sont actuellement développés en France : le biodiesel issu du colza ou du tournesol, incorporé au gasoil, et le bioéthanol issu de betteraves à sucre ou de graines de céréales, incorporé à l'essence. Les surfaces dédiées aux biocarburants ont été multipliées par trois depuis 1998, dépassant deux millions d'hectares en 2008. La production totale de biocarburants en France était de 2,279 millions de tonnes équivalent pétrole (Mtep) en 2009 (dont 1,8 Mtep de biodiesel). Cet essor rapide a notamment été permis par un contexte politique très incitatif : autorisation de cultures non alimentaires sur les jachères, subvention aux cultures énergétiques instaurée en 2004 (supprimée depuis), exonérations fiscales, objectifs d'incorporation ambitieux.

Le plan Biocarburants français va au-delà des objectifs de la directive européenne de 2003 qui vise l'incorporation de 5,75 % de biocarburants dans les carburants en 2010. En effet, la France a atteint cet objectif dès 2008, et prévoyait un taux d'incorporation de 7 % en 2010 et de 10 % en 2015. La France était ainsi, en 2009, le deuxième producteur mondial de biodiesel der-

rière l'Allemagne (avec 12 % de la production mondiale) et le cinquième producteur mondial de bioéthanol (2 %, derrière les États-Unis, le Brésil, la Chine et le Canada).

Le développement futur des biocarburants reste soumis à plusieurs incertitudes, comme les innovations technologiques qui devraient permettre un meilleur rendement énergétique à moindre coût, ou le contexte économique et politique (maintien des dispositifs incitatifs, prix des autres énergies, poursuite de la défiscalisation des énergies fossiles en agriculture, etc.). En outre, les bilans écologiques et énergétiques des biocarburants font débat. La crise alimentaire de 2008 a également contribué à relancer la discussion sur les impacts négatifs des biocarburants sur l'environnement (utilisation d'eau, d'intrants et de terres) et la sécurité alimentaire (disponibilité et prix). La directive 2009/28/CE en cours de mise en œuvre impose des conditions de durabilité destinées à répondre à ces préoccupations. La stabilisation de ces controverses sera déterminante pour l'avenir de ces productions.

C.L., F.P., J.V.

duisant des énergies renouvelables (EnR) pour sa propre consommation ou pour les autres secteurs (transports, chauffage et refroidissement, électricité). Les EnR d'origine agricole recouvrent la production d'énergie issue de biomasse (méthanisation, biocarburants) ainsi que des installations générant de la chaleur ou de l'électricité (panneaux solaires, éolien, etc.) sur les toits et sols agricoles. Si leur part reste faible aujourd'hui en comparaison de l'hydraulique et du bois-énergie, elle est en croissance très forte depuis les années 2000 avec la mise en place de politiques énergétiques incitatives. Le Grenelle de l'environnement⁷ a fixé un objectif de 23 % d'EnR dans la consommation finale d'énergie en 2020, dont près de 60 % devront être fournis par de la biomasse agricole et forestière. Aujourd'hui, il s'agit principalement des biocarburants, de la méthanisation et du solaire photovoltaïque.

7. Processus participatif lancé en 2007 en France, visant à prendre des décisions de long terme en matière d'environnement et de développement durable, ayant notamment débouché sur deux séries de lois (Grenelle I en juin 2009, et Grenelle II en juillet 2010) (NDLR).

Plusieurs incertitudes sont susceptibles d'influer sur les liens entre l'agriculture et l'énergie à moyen terme : l'évolution des prix agricoles et de l'énergie sur les marchés internationaux, celle des soutiens à l'agriculture et au développement des EnR, la mise en œuvre de mesures environnementales plus ou moins contraignantes, etc. La question de l'énergie invite donc naturellement à se projeter dans le futur (voir aussi l'encadré page suivante).

Quatre scénarios contrastés et chiffrés à l'horizon 2030

Les scénarios ne sont pas des pronostics sur l'avenir, encore moins l'expression des préférences du groupe Agriculture énergie 2030 ou du MAA-PRAT, mais des conjectures stylisées visant à mobiliser et alerter les acteurs et les décideurs. Ils sont présentés ici de manière synthétique, les versions complètes, illustrées de faits porteurs d'avenir et de ruptures possibles, sont disponibles dans le rapport *Agriculture énergie 2030*.

Scénario 1. Territorialisation et sobriété face à la crise

La hausse du prix des énergies fossiles est soutenue tout au long de la décennie 2010, tirée par la croissance économique des BRIC (Brésil, Russie, Inde, Chine). Or, l'offre ne suit pas car les investissements en exploration et production ont été négligés. De plus, les technologies alternatives aux énergies fossiles ne sont pas au rendez-vous, l'Europe et les États-Unis se prêtant à un « attentisme climatique ». Des problèmes techniques et géopolitiques récurrents viennent perturber les approvisionnements en produits pétroliers, propulsant durablement le baril de pétrole au-delà de 200 dollars US.

Au niveau des exploitations agricoles françaises, les charges liées à l'énergie augmentent très fortement (+ 50 % pour le poste énergie, + 30 % pour les engrais

par rapport aux valeurs 2006), ce qui se traduit par une baisse du revenu des agriculteurs de 20 %. Les systèmes les plus durement touchés sont ceux qui dépendent de consommations intermédiaires intensives en énergie : les élevages intensifs (alimentation du bétail), les grandes cultures (engrais), les cultures sous serre (chauffage). Une crise aiguë intervient en 2015, avec une rupture d'approvisionnement en engrais azotés.

Face à la crise énergétique, l'absence d'anticipation et de réponse de l'État est fortement dénoncée. Les collectivités locales multiplient quant à elles les plans de soutien aux filières locales au nom du maintien de l'emploi et de

Ce scénario est marqué par un contexte énergétique particulièrement tendu et l'absence d'anticipation. Parallèlement, une crise institutionnelle débouche sur une montée en puissance des régions. L'agriculture s'adapte dans l'urgence en adoptant une stratégie orientée vers le local et la sobriété

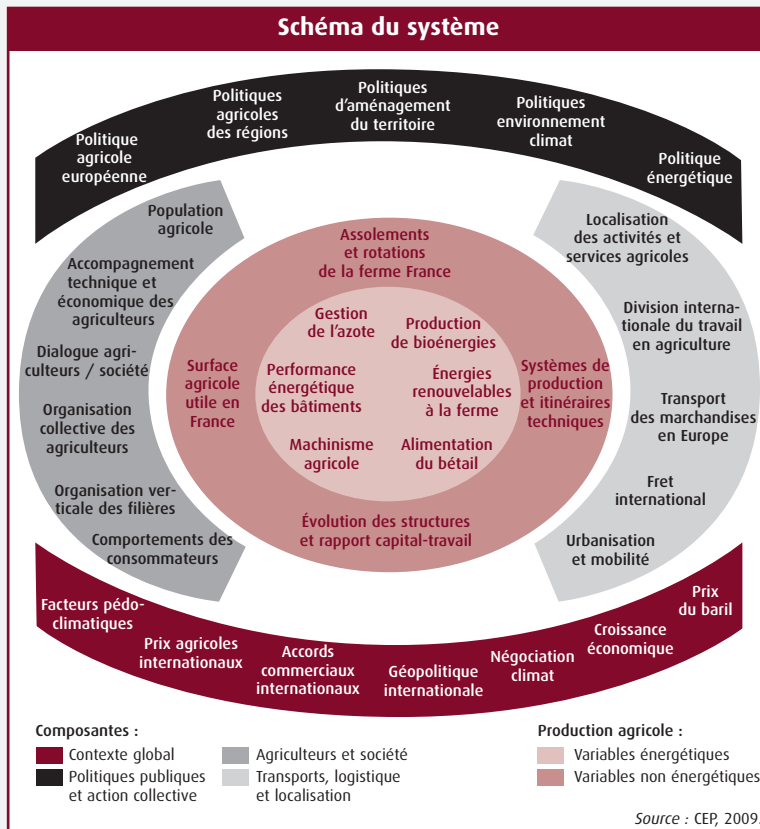
UNE DÉMARCHE COLLECTIVE BASÉE SUR LA MÉTHODE DES SCÉNARIOS

Pour traiter la complexité de la question énergétique en agriculture, il a été choisi d'adopter une démarche collective basée sur la méthode des scénarios. Le Centre d'études et de prospective a réuni un groupe d'une quarantaine d'acteurs d'horizons et de compétences variés (ministères concernés, agences et établissements publics, instituts techniques, monde agricole, *think-tanks*, organismes de recherche, société civile, secteur privé, etc.).

La première étape a permis de diagnostiquer les principaux enjeux et de

cadre l'exercice sur l'agriculture métropolitaine, sans prendre en compte la pêche ni la sylviculture. Le choix de l'horizon temporel, 2030, constitue un compromis entre d'une part la volonté de s'affranchir des effets de conjoncture, et d'autre part la nécessité de travailler à une échelle de temps suffisamment proche pour être maîtrisable.

Le groupe a ensuite ordonné l'ensemble des enjeux en un système de 33 variables regroupées en cinq composantes (voir ci-dessous). Trente-trois fiches-variables¹ décrivent les tendances pas-



1. Dont 11 sont consultables sur le site Internet <http://agriculture.gouv.fr/fiches-variables-agriculture>

sées, les principales incertitudes et une série d'hypothèses contrastées d'évolution future.

Les scénarios ont ensuite été construits en associant les hypothèses de chaque variable. On obtient ainsi des images contrastées et cohérentes de ce qui peut advenir, présentées sous forme de récits, et permettant de prendre conscience des contraintes comme des opportunités.

Dans un troisième temps, le chiffrage des volumes de production et des

consommations énergétiques totales dans l'ensemble des exploitations, à l'aide de l'outil Climagri (voir la troisième partie de cet article) a permis de comparer les scénarios et d'alimenter la phase d'analyse stratégique. Les marges de progrès dans les bilans énergétiques de la « ferme France » identifiées par les chiffrages, ont conduit à dégager des objectifs généraux et des leviers d'action.

C.L., F.P., J.V.

l'autonomie alimentaire. En 2018, une réforme majeure des chambres d'agriculture intervient, qui conduit à les rendre très dépendantes des conseils régionaux. En 2020, l'Union européenne décide de transférer une part importante des dépenses de la PAC (politique agricole commune) vers les budgets nationaux ou régionaux.

À la fin de la période, certaines régions font figure de pionnières et sont parvenues à créer un contexte favorable à l'autonomie énergétique des exploitations au niveau territorial : en diversifiant les productions sur leur territoire, en soutenant ou en lançant de nouvelles filières (polyculture-élevage, production énergétique, relance des légumineuses⁸), en favorisant les échanges entre les exploitations (projets de méthanisation à l'échelle d'exploitations voisines, fabrication des aliments à la ferme, etc.). À l'échelle de la France, on trouve ainsi « un peu de tout partout ». L'agriculture française réduit fortement ses consommations énergétiques (- 32 % entre 2006 et 2030). Les rendements baissent d'environ 20 % et la capacité à l'export de la « ferme France » diminue très fortement. Cependant, à l'horizon 2030, cette transformation n'est pas harmonisée sur l'ensemble du territoire et il existe de fortes disparités régionales.

Scénario 2. Agriculture duale et réalisme énergétique

Ce scénario prend naissance dans un contexte international marqué par la course à la compétitivité entre grandes régions du monde. Malgré l'augmentation du prix du pétrole, qui s'inscrit comme une tendance lourde, les mesures en matière de « signal prix environnemental » sont bloquées car aucun pays ne souhaite entraver sa croissance économique par des contraintes sur la production.

8. Les légumineuses sont une famille de plantes cosmopolite, dont les plus connues sont les lentilles, les pois, les féveroles et le soja. L'existence de nodules sur leurs racines leur permet d'absorber et de fixer dans le sol l'azote de l'air, réduisant les besoins en engrais minéraux.

Lors de la réforme de 2013, le budget communautaire de la PAC baisse nettement. Le montant des aides directes diminue et converge entre les pays européens. Dans un premier temps, des aides de l'État français viennent accompagner la transition, puis elles sont peu à peu abandonnées. Parallèlement,

des mécanismes incitatifs sont mis en place auprès des agriculteurs pour rémunérer la production de « biens publics » et de services environnementaux (eau, biodiversité, paysage, stockage du carbone) liés à un certain nombre de bonnes pratiques agricoles.

Dans un contexte de forte volatilité des prix de l'énergie, de baisse des soutiens publics à l'agriculture et de libéralisation accrue des échanges, on assiste à la polarisation entre deux types d'agriculture dont les stratégies en matière d'efficacité énergétique sont très différentes

L'accroissement du prix de l'énergie contribue tendanciellement à

maintenir des prix agricoles élevés en augmentant les coûts de production. Il stimule également la production de biocarburants (première génération puis, dès 2020, deuxième génération). Les prix agricoles mondiaux restent en outre très volatils.

Progressivement, deux types d'agriculture se distinguent :

— Une « agriculture d'entreprise » (principalement dans les régions de plaines du nord, du centre et de l'ouest) qui recherche la compétitivité et se positionne à l'export. L'optimisation énergétique de ces exploitations répond à une logique économique et bénéficie d'une offre technologique et de conseil privée.

— Une « agriculture multifonctionnelle » qui bénéficie de la rémunération des services environnementaux qu'elle rend. Il s'agit principalement d'élevage à l'herbe, d'agriculture biologique et de polyculture-élevage. Ces exploitations adoptent des stratégies d'autonomie et de sobriété proches de celles du scénario 1.

Globalement, les surfaces en grandes cultures se développent tandis que des terres agricoles sont abandonnées dans les régions les moins compétitives. Les consommations d'énergie diminuent peu et les EnR connaissent une croissance modérée, la volatilité des prix freinant les investissements.

Scénario 3. Agriculture-santé sans contrainte énergétique forte

Les prix de l'énergie et les prix agricoles ne connaissent pas d'envolée sur la période, le contexte international restant stable et l'offre de pétrole parvenant à satisfaire la demande grâce à des investissements soutenus en exploration, production et raffinage. Les couches moyennes et aisées n'ayant pas de problème de pouvoir d'achat, la santé passe en tête de leurs préoccupations.

Cette évolution est accompagnée d'une médiatisation croissante des enjeux sanitaires (vogue des documentaires engagés et émissions télévisées

« chocs ») qui accroît la sensibilité au risque. La forte demande pour des produits plus sains est largement relayée par la grande distribution et les industries agroalimentaires, qui font pression sur les producteurs et leurs fournisseurs pour qu'ils réduisent l'usage de produits phytosanitaires.

Certains espaces agricoles péri-urbains sont protégés pour répondre à la demande d'espaces verts des urbains et aux enjeux d'approvisionnement alimentaire de proximité. Des investissements massifs sont portés dès 2010-15 par les pouvoirs publics, en synergie avec le secteur privé, pour développer des sites pilotes de biocarburants, ce qui accélère le développement de la deuxième génération.

Le pilotage des filières agricoles est dominé par l'aval, les labels et cahiers des charges des industries agroalimentaires ou de la grande distribution se faisant très prescriptifs sur les pratiques agricoles. Les producteurs s'adaptent plus ou moins bien, certaines filières subissant négativement cette nouvelle contrainte.

En 2030, les apports d'engrais ont diminué de 15 % par rapport à 2006. L'agriculture biologique s'est fortement développée, tirée par une demande soutenue et bénéficiant d'importants progrès agronomiques et techniques. Les énergies renouvelables à la ferme connaissent en revanche une progression modérée.

Scénario 4. Agriculture écologique et maîtrise de l'énergie

La première moitié de la décennie 2010 est marquée par un fort attentisme politique vis-à-vis des enjeux énergétiques, climatiques et environnementaux. La montée des préoccupations environnementales se poursuit cependant, entretenue notamment par les organisations non gouvernementales et renforcée par plusieurs événements emblématiques (étés caniculaires, ouragans aux États-Unis). Trois années de mauvaises récoltes dues à la sécheresse, l'augmentation du prix du baril de pétrole et la multiplication de stratégies nationales protectionnistes, entraînent une forte hausse des prix agricoles et une nouvelle crise alimentaire mondiale.

Ce scénario n'est pas soumis à une contrainte énergétique forte, mais aux exigences croissantes des consommateurs (principalement urbains) en matière de réduction des pesticides. Le résultat est une légère baisse de la consommation énergétique globale, la réduction des intrants étant partiellement compensée par une utilisation accrue du machinisme

À la suite de catastrophes climatiques augmentant la sensibilité aux enjeux environnementaux, l'Union européenne se fait précurseur d'un nouveau modèle de croissance plus sobre et plus autonome. L'agriculture française évolue vers de nouveaux modèles de production à plus faible impact climatique et environnemental, soutenue par une politique agricole réformée

L'idée de faire de l'Europe le précurseur d'un modèle de croissance plus sobre et plus autonome fait son chemin. Plusieurs *success stories* industrielles dans le domaine des éco-technologies popularisent l'idée de « croissance verte ». Un accord climatique États-Unis / Union européenne intitulé « Alliance pour le climat » est signé en 2016, qui prévoit des objectifs chiffrés ambitieux de réduction des émissions à l'horizon 2030, la mise en place d'un marché commun du carbone sur le modèle européen et l'instauration d'une compensation carbone aux frontières sur tous les produits importés. La création d'une Organisation mondiale de l'environnement et du climat, en 2021, élargit graduellement cet accord à d'autres pays.

La PAC est profondément réorientée à partir de 2017. Les financements sont mis au service d'une modernisation écologique de l'agriculture pour

Synthèse et comparaison des scénarios				
Scénarios	S1 : Territorialisation et sobriété face à la crise	S2 : Agriculture duale et réalisme énergétique	S3 : Agriculture-santé sans contrainte énergétique forte	S4 : Agriculture écologique et maîtrise de l'énergie
Contexte global	Prix du pétrole durablement élevé Repli des échanges	Forte volatilité et hausse tendancielle du prix du baril Compétition entre grandes régions du monde	Stabilisation du prix du pétrole Stratégies défensives, spécialisations compétitives	Prix du carbone élevé Coopération internationale accrue
Politiques agricole et environnementale	PAC renationalisée et déléguée aux régions Mosaïque de politiques énergétiques, agricoles et environnementales	Forte baisse des aides agricoles mais rémunération des services environnementaux	Politique ambitieuse d'alimentation santé	Politiques agricole et environnementale intégrées et ambitieuses
Transport et organisation des filières	Relocalisation à l'échelle régionale Rééquilibrage des bassins de production	Spécialisation des territoires et accroissement des disparités Augmentation des flux de marchandises	Croissance et innovation dans les transports Très fort poids de l'aval sur les filières	Recentrage sur l'Europe et report modal Modernisation écologique des filières
Agriculteurs	L'agriculteur, acteur des territoires	Divergence entre logique agro-industrielle et multifonctionnalité	L'agriculteur « alimentateur »	L'agriculteur écologique et agronome
Modèle agricole emblématique	Polyculture-élevage	Dualité : agriculture d'entreprise vs agriculture multifonctionnelle	Agriculture intégrée à fort niveau de technicité	Agriculture à haute valeur environnementale
Agriculture et énergie	Autonomie énergétique et sobriété : protéagineux, HVP ^a , autoconsommation d'EnR (dont méthanisation), échanges de coproduits entre exploitations voisines	Agriculture d'entreprise : optimisation économique, fort développement des biocarburants Exploitations multifonctionnelles : recherche de l'autonomie (voir scénario 1)	Réduction modérée des intrants, fort développement des biocarburants de deuxième génération	Intensification écologique : méthanisation, légumineuses, innovation variétale, semis direct, échanges de coproduits Biocarburants de deuxième génération et importante production d'EnR

^aHuiles végétales pures, utilisées comme carburant agricole.

aller vers plus d'autonomie, moins d'impact environnemental, tout en continuant à produire les aliments et la biomasse dont l'Europe a besoin. En parallèle, les consommateurs réhabilitent un modèle d'alimentation plus exigeant en temps et en moyens budgétaires, en l'acceptant comme une composante à part entière du mieux-vivre.

À partir de 2020, dans les grandes plaines céréalières, l'agriculture française s'oriente vers un modèle écologiquement intensif en recourant notamment à la diversification des cultures, à la relance des légumineuses et au semis direct. Une part importante de ces surfaces est dédiée à la production de biocarburants et de bioproduits. Dans les zones intermédiaires et de montagne, les agriculteurs sont rémunérés pour la fourniture de services environnementaux et sont encouragés à rechercher une plus grande autonomie à l'échelle de l'exploitation (systèmes plus diversifiés basés sur la polyculture et l'élevage) ou à l'échelle du territoire (complémentarités entre exploitations sur le modèle de l'écologie industrielle). La méthanisation et les biocarburants connaissent un fort développement.

Marges de manœuvre, analyse stratégique et recommandations

Dans une réflexion prospective comme celle engagée avec « Agriculture énergie 2030 », la formulation de scénarios est une étape importante, mais elle n'est pas un objectif en soi. La démarche Agriculture énergie 2030 a donc comporté une importante phase d'analyse stratégique, trop souvent délaissée dans ce type d'exercice.

Comparaison quantitative et qualitative des scénarios

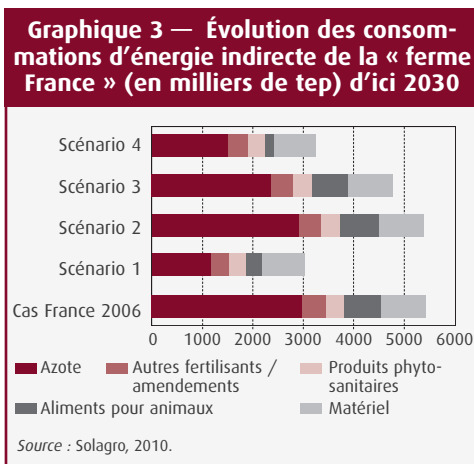
Dans un premier temps, pour améliorer leur cohérence et mieux éclairer les enjeux énergétiques en agriculture, les scénarios ont fait l'objet d'un chiffrage à l'aide de l'outil Climagri, mis à disposition par l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie). Les principales données d'entrée de l'outil sont des paramètres agronomiques comme les surfaces, les rendements, les apports d'engrais, les cheptels, la consommation de fioul par hectare, la composition des rations animales, etc. Ils ont été estimés à dire d'experts dans chacun des scénarios et validés par le groupe Agriculture énergie 2030. Les résultats fournis par l'outil sont la production agricole, les consommations d'énergie directe et indirecte par postes et par usages, et les émissions de gaz à effet de serre par types d'élevage et par cultures. De plus, un bilan azoté du territoire est réalisé, ce qui permet d'assurer une cohérence entre les apports et les exportations d'azote. L'outil calcule enfin un bilan fourrager qui permet de vérifier que les besoins des animaux sont couverts par la production de fourrages et de céréales disponible.

L'utilisation d'un outil de quantification permet ainsi de tester la cohérence des scénarios tout en facilitant leur appropriation grâce à des données

chiffrées illustratives. De manière générale, cette étape de chiffrage contribue également au processus dynamique de construction des scénarios, en poussant à analyser davantage les effets des changements décrits. Il convient cependant de souligner que ces chiffrages restent très sensibles aux hypothèses d'entrée qui ont été élaborées à dire d'experts. Ils ne sauraient donc constituer des projections des consommations d'énergie, des émissions de gaz à effet de serre ou de la production de la « ferme France » à l'horizon 2030, mais ont seulement vocation à illustrer les scénarios.

La comparaison qualitative et quantitative des bilans énergétiques de la « ferme France » dans chacun des scénarios vise à identifier les marges de progrès et les leviers d'action en matière de réduction de la dépendance de l'agriculture aux énergies fossiles, et d'amélioration de la performance énergétique des exploitations. On constate d'emblée que chacun des scénarios conduit à des économies d'énergie par rapport à la consommation de la « ferme France » en 2006 (entre - 8 % et - 32 % d'énergie directe et indirecte consommée). Ce résultat *a priori* surprenant s'explique par le fait qu'une part de ces baisses de consommation est inscrite dans l'évolution tendancielle. Elle est due aux hypothèses de progrès technologique et d'amélioration de l'efficacité énergétique retenues dans tous les scénarios : investissements déjà engagés en 2010 en matière de substitution des énergies fossiles et d'économie d'énergie (isolation des bâtiments d'élevage, notamment), optimisation du machinisme agricole et passage des tracteurs au banc d'essai moteurs, avancées technologiques dans la fabrication des intrants agricoles (engrais principalement). Au-delà de ces baisses tendancielle, les bilans énergétiques de la « ferme France » varient fortement d'un scénario à l'autre. Cela montre qu'il existe des marges de progrès en agriculture dans différents contextes économiques, politiques et sociaux au cours des 20 prochaines années.

Les principaux écarts portent sur les consommations d'énergie indirecte (voir graphique 3). Dans les scénarios 1, 3 et 4, la « ferme France » réduit

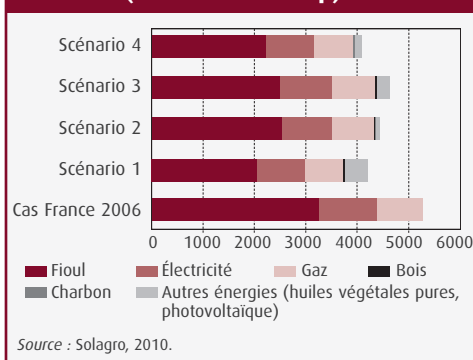


ses consommations d'engrais azotés (de respectivement - 61 %, - 15 % et - 40 % par rapport à 2006). Cette diminution n'entraîne pas nécessairement une baisse des rendements et de la production, à condition d'être correctement anticipée et de faire l'objet d'une véritable stratégie agronomique (recours accru aux légumineuses, mobilisation des sources d'azote organique). Les consommations d'énergie de la « ferme France » varient également sur le poste de l'alimentation animale. Sur ce

point, le scénario 4 est le plus économe. Les importations de tourteaux de soja y sont en effet quasiment supprimées grâce à un fort développement des légumineuses et un recours accru à l'herbe. Dans le scénario 1, ces importations sont divisées par quatre par rapport à 2006. Dans ces deux cas, les élevages hors sol optent pour plus d'aliments produits sur l'exploitation ou à proximité, et l'élevage bovin recourt davantage au pâturage.

En matière d'énergie directe (voir graphique 4), c'est le poste carburants qui conduit aux plus forts écarts entre les scénarios. Les agriculteurs réduisent ainsi leur consommation de fioul respectivement d'un quart et d'un tiers dans les scénarios 1 et 4. Deux facteurs expliquent ces économies : l'utilisation d'huiles végétales pures comme carburant et la suppression du labour au profit de techniques simplifiées de travail du sol (plus économes en énergie).

Graphique 4 — Évolution des consommations d'énergie directe de la « ferme France » (en milliers de tep) d'ici 2030



Les scénarios ne sont que des images stylisées de l'avenir aidant à prendre conscience des difficultés et problèmes futurs ou, inversement, des opportunités à saisir. La prospective n'est pas pure imagination : elle se doit d'être pragmatique en mettant l'anticipation au service de l'action. Pour cela, le groupe de travail a choisi de ne pas hiérarchiser les scénarios selon leur caractère plus ou moins probable ou souhaitable. Il a considéré que ce type de classement, souvent peu robuste et subjectif, pouvait nuire à la richesse des enseignements tirés de la démarche prospective. Il a préféré considérer que les quatre scénarios brossent, ensemble, un tableau riche et réaliste des évolutions probables de l'agriculture française, et que c'est par rapport à ce tableau général que les recommandations devaient être faites.

Enseignements et recommandations stratégiques

Les enseignements tirés de la démarche ont ainsi été traduits en quatre grands objectifs généraux pour l'action publique du ministère chargé de l'Agriculture et des partenaires concernés, puis déclinés en 13 objectifs opérationnels. Ces objectifs constituent la vision commune du groupe Agriculture énergie 2030 sur les enjeux et les choix à privilégier à moyen terme, quel que soit le scénario d'évolution. Ils portent sur la réduction des consommations énergétiques, d'une part au niveau des exploitations (premier objectif), d'autre part dans les bassins de production et les filières (deuxième objectif), et sur la production d'EnR par le secteur agricole (troisième objectif). L'atteinte de ces trois objectifs soulève des défis techniques importants :

un dernier objectif de moyens est donc consacré à la R&D (recherche-développement) et à la diffusion de l'innovation sur les enjeux énergétiques en agriculture.

Chaque objectif opérationnel a fait l'objet d'une analyse ressources-contraintes-stratégie dans chacun des quatre scénarios. Les ressources et les contraintes sont appréhendées de manière très large, et regroupent l'ensemble des éléments qui permettent ou empêchent d'atteindre l'objectif au cours des 20 prochaines années. En découle une stratégie constituée d'un ensemble d'actions à mettre en œuvre par scénario. Les tableaux ainsi complétés, disponibles dans le rapport final, constituent une large source d'informations et d'expertises sur les marges de manœuvre pour l'action publique, ainsi qu'un riche ensemble de stratégies pouvant être mises en œuvre. Ces tableaux d'analyse stratégique ont fait l'objet d'une lecture transversale. Il s'agit alors de s'extraire des quatre scénarios et de regarder, pour chaque objectif général, les contraintes qui s'appliquent et les ressources mobilisables quel que soit le scénario. Cela permet de dégager des leviers d'action transversaux et d'esquisser des stratégies « sans regrets », c'est-à-dire des orientations et des pistes d'action valables quelle que soit l'évolution future de l'agriculture et du contexte énergétique.

Il ressort de cette analyse que la fertilisation constitue un élément central du bilan énergétique. Les leviers techniques pour réduire les apports azotés sont connus : mise en place de rotations longues et d'assolements diversifiés, recours accru aux légumineuses, couverture maximale du sol, etc. Le groupe considère que leur généralisation nécessite un effort de sensibilisation et de formation des agriculteurs, et appelle sans doute la mobilisation d'outils normatifs ou économiques forts (contrainte réglementaire ou signal prix). Les travaux ont également mis en évidence l'intérêt de la méthanisation comme source d'approvisionnement en éléments fertilisants, à condition que les digestats⁹ soient correctement valorisés. L'intérêt de la méthanisation est en outre de produire des énergies renouvelables. Le groupe considère que le dispositif existant pour soutenir l'installation d'unités de méthanisation devrait être complété par des tarifs d'achat du biogaz incitatifs. Il existe en effet un fort potentiel pour le développement de grosses unités de méthanisation mobilisant l'ensemble des ressources en biomasse disponibles et qui pourraient injecter du biogaz directement dans le réseau de distribution.

Privilégier l'approvisionnement local en protéines pour l'alimentation animale est apparu comme une stratégie majeure. L'enjeu est de favoriser la réduction du transport de ces intrants par une autoproduction ou un approvisionnement local, et de privilégier les sources de protéines dont la production nécessite peu d'engrais. Les systèmes à l'herbe méritent d'être particulièrement encouragés compte tenu de leur autonomie et des nombreuses aménités qu'ils fournissent.

9. Résidus générés par les procédés de digestion anaérobie de la matière organique (NDLR).

Le machinisme constitue un important gisement d'économies de carburant et un levier que le groupe juge facilement mobilisable (réglage et entretien des tracteurs, renouvellement des engins et réduction de leur puissance). La suppression du labour (notamment par le semis direct) constitue en outre une voie intéressante pour réduire les consommations de carburant en grandes cultures ; elle requiert néanmoins des efforts importants de formation et de recherche. Réduire les consommations énergétiques des bâtiments est également une nécessité pour les filières très consommatrices d'énergie directe. Des investissements à grande échelle seraient à réaliser dans l'aménagement des bâtiments et leur bonne isolation, l'installation de récupérateurs de chaleur ou de chaudières biomasse, l'optimisation de l'éclairage, etc.

Des innovations dans l'organisation des filières permettraient d'améliorer le bilan énergétique des bassins de production. Le groupe préconise pour cela la diversification des systèmes de production et les échanges entre exploitations. Il conviendrait donc de soutenir les agriculteurs qui s'engagent dans des modes de production innovants (complémentarités culture-élevage, agriculture biologique, haute valeur environnementale, etc.), par des politiques foncières et d'installation proactives, en particulier dans les zones les plus spécialisées. Des pistes sont également à explorer pour améliorer la performance énergétique des circuits courts : mutualisation des livraisons, report modal, non-retour à vide, etc.

Pour le groupe Agriculture énergie 2030, le développement des énergies renouvelables doit être soutenu et maîtrisé. Les énergies renouvelables hors biomasse peuvent fournir un complément de revenu, en fonction des capacités d'investissement des agriculteurs et du potentiel local. La modération des tarifs d'achat doit permettre d'éviter une trop forte spéculation. Concernant les biocarburants, les soutiens publics devraient privilégier les filières les plus compétitives et les plus performantes d'un point de vue environnemental, ce qui dégagerait des marges de manœuvre budgétaires pour accroître les efforts de R&D. Ces aides devraient être conditionnées à des critères de durabilité exigeants, en cours d'élaboration. La fiscalité des carburants agricoles pourrait en outre être revue afin d'encourager les comportements économes, et d'inciter à la production et à l'autoconsommation d'huiles végétales pures.

La prospective Agriculture énergie 2030 a permis enfin de mettre en évidence des pistes pour la recherche agronomique et la diffusion de l'innovation en agriculture. En effet, les connaissances devraient être approfondies sur les consommations d'énergie indirecte (notamment pour l'alimentation animale), les bilans énergétiques tout au long des filières agricoles, la logistique des produits agricoles et alimentaires et son contenu énergétique. En parallèle, les recherches sur les systèmes de production devraient porter particulièrement sur les systèmes économes en énergie (production intégrée, systèmes herbagers) ou encore sur les techniques alternatives au labour. Le soutien à l'agriculture biologique devrait s'accompagner de recherches pour augmenter les rendements et d'actions pour réduire les consommations

d'énergie directe (fioul, électricité). La diffusion de l'innovation est la clef de voûte de toute stratégie gagnante. La gouvernance de la R&D pourrait être élargie, par exemple par la mise en œuvre de comités d'innovation impliquant les acteurs dans les organismes de recherche. Il est également souhaitable de développer un réseau de fermes d'expérimentation permettant d'élaborer et de diffuser des pratiques innovantes et des références techniques.



La prospective Agriculture énergie 2030 invite à sortir du « court-termisme ». La thématique de l'énergie est en effet trop souvent considérée comme un problème conjoncturel dont on peut se détourner lorsque la contrainte économique paraît moins forte ou que d'autres questions semblent plus urgentes. Cet exercice amène donc à considérer l'avenir comme ouvert et à construire. Il éclaire les défis et les opportunités que soulève la question énergétique en agriculture, et se veut ainsi un outil d'alerte et de mise en débat qui doit permettre à l'ensemble des acteurs de définir une stratégie cohérente et ambitieuse face aux défis énergétiques.

Le nucléaire, solution d'avenir ou du passé ?

PAR CORINNE LEPAGE ¹

Le 11 mars 2011, le Japon était victime d'un séisme de très forte magnitude, suivi d'un tsunami qui fit des milliers de morts dans la région de Sendai, et qui eut surtout pour conséquence une catastrophe nucléaire majeure dans la centrale de Fukushima. Cet accident nucléaire a été classé au plus haut degré de gravité sur l'échelle internationale des événements nucléaires, ce qui en fait le plus important depuis celui de Tchernobyl en 1986. Il est encore impossible de mesurer l'ampleur exacte des conséquences économiques, sanitaires et humaines de cette catastrophe, mais il est clair qu'elle a relancé les débats les plus vifs sur la question nucléaire.

Même si les catastrophes nucléaires de cette gravité sont relativement rares, les conséquences qui s'ensuivent justifient-elles que l'on continue à recourir à cette source d'énergie, certes peu émettrice de gaz à effet de serre, mais productrice de nombreux déchets très dangereux dont la durée de vie dépasse souvent le siècle ? Dans ce numéro estival intégralement consacré aux questions énergétiques, la revue Futuribles pose la question dans sa rubrique « Forum ».

Corinne Lepage, spécialiste des questions environnementales et ex-ministre français de l'Environnement, nous livre ici son point de vue, estimant en substance que les risques à la fois humains, écologiques et financiers sont bien trop grands pour qu'on les coure, en particulier dans un monde où les sources d'énergie renouvelables peuvent désormais répondre, pour une large part, aux défis énergétiques et climatiques auxquels il nous faut faire face. S.D. ■

1. Ministre français de l'Environnement de 1995 à 1997, députée européenne et présidente du mouvement Cap21 ; auteur de *La Vérité sur le nucléaire. Le choix interdit*. Paris : Albin Michel, 2011.

Le nucléaire est-il une solution de l'avenir ou du passé ? Je répondrai, sans hésitation, du passé en ce qui concerne le nucléaire tel que nous le connaissons. Il est possible que la réussite de la fusion nucléaire ou l'invention d'un nucléaire en capacité de consumer ses propres déchets ou encore d'un surgénérateur qui fonctionnerait (ce qui n'a pas été le cas de l'échec cuisant de Creys-Malville²) puissent intervenir dans quelques décennies. Mais ces hypothèses — plus qu'aléatoires en l'état actuel des choses, en particulier pour la fusion dont les professeurs Charpak ou de Gennes considèrent que les obstacles scientifiques n'ont en rien été levés — ne présentent aucun intérêt pour la résolution des problématiques énergétiques et sont incompatibles avec l'urgence de trouver des solutions immédiates pour sortir de la société du pétrole.

Au passage, il faut noter la puissance actuelle des *lobbies* pétroliers et gaziers pour empêcher l'humanité d'aller dans la voie de la société post-pétrolière. Les pressions en faveur de l'exploitation des gaz de schiste, nouvel eldorado pour ces sociétés comme pour toutes celles, comme Halliburton, qui « creusent les trous » et passent les tuyaux, témoignent suffisamment de l'absence de cohérence des choix publics et de la parfaite indifférence des exploitants comme des décideurs politiques à l'égard de la pollution chimique d'une part, de l'ajout immense des émissions de gaz à effet de serre d'autre part, que provoque l'exploitation des gaz de schiste comme du reste des sables bitumi-

neux dans le nord du Canada ou des États-Unis.

Le nucléaire, une solution du passé

Pour en revenir au nucléaire actuellement exploité ou en projet, c'est une solution du passé et qui ne peut prospérer que pour autant que les citoyens assument le risque humain et surtout financier des catastrophes nucléaires à répétition, puisque les autorités de sûreté — voir la déclaration de Jacques Repussard³ en avril 2011, lors de la conférence de Kiev sur les 25 ans de Tchernobyl — admettent que le risque de catastrophe nucléaire est d'un tous les 20 ans.

La première question est donc celle de savoir si nos concitoyens et plus généralement tous les habitants des pays nucléarisés, et plus généralement encore tous les Terriens et en particulier ceux qui ne seraient que des victimes du nucléaire, sont prêts à accepter un risque aussi important. Rappelons que dans les pays industrialisés et en particulier en France, le recours à l'énergie nucléaire s'est fait sur le dogme d'une sécurité absolue.

Celui-ci est aujourd'hui battu en brèche et l'était déjà avant Fukushima. Par exemple, les communes riveraines des centrales nucléaires se sont vu imposer récemment des interdictions de construire à moins de trois kilomètres des centrales, ce qu'elles contestent dans la mesure où l'installation de ces centrales s'était faite sur le mythe d'une sécurité absolue qui ne nécessitait aucune mesure de protection particulière pour le voisinage. *A for-*

2. Site nucléaire qui a abrité le prototype de réacteur Superphénix, mis à l'arrêt en 1998 et en cours de démantèlement (NDLR).

3. Directeur général de l'Institut de radioprotection et sûreté nucléaire (NDLR).

tiori, Fukushima anéantit toutes les méthodologies actuelles d'évaluation des risques dans la mesure où ces méthodologies reposaient sur des scénarios de probabilité. Or, le scénario de Fukushima n'avait pas été prévu, de telle sorte qu'aucune anticipation n'avait été mise en place pour un scénario qui n'existait pas. D'où une improvisation permanente qui aujourd'hui nous confronte à une catastrophe nucléaire d'une ampleur tout à fait comparable en réalité à celle de Tchernobyl, même si son déroulement et ses conséquences sont de nature différente.

Cette prise de conscience a conduit les autorités publiques et en particulier la Commission européenne à exiger des *stress tests* pour que toutes les centrales fassent l'objet d'une réévaluation complète des risques. Mais en réalité, les centrales n'ayant pas été conçues en fonction de ces nouvelles évaluations, les solutions de prévention qui pourraient être mises en place ne pourront en toute hypothèse qu'être des palliatifs lorsqu'ils s'avéreront possibles, ce qui ne sera évidemment pas le cas des centrales soumises à un risque sismique. Dès lors, nous sommes bien en face d'un risque humain financier et économique immense qui n'est assuré par personne.

C'est précisément parce que les États-Unis sont plus exigeants que d'autres pays dans ce domaine que la rentabilité des centrales nucléaires aux États-Unis n'est en aucune manière établie. Pour les pays nucléarisés qui ont ratifié la convention de Paris⁴ et celles qui ont suivi sur la responsabilité en cas d'accident nu-

cléaire, la limitation de responsabilité, au demeurant focalisée sur l'exploitant, est très modeste. Rappelons en effet que le plafond maximal est de 1,5 milliard d'euros ; les obligations d'EDF (Électricité de France), qui sont parmi les plus faibles du monde, s'élèvent à 91 millions d'euros. Et au Japon, l'État est contraint de se substituer à l'exploitant défaillant, TEPCO (Tokyo Electric Power Company), pour payer les coûts minimaux. Il semblerait que les Japonais chassés de chez eux aient touché 8 000 euros. Cela signifie donc, en réalité, qu'un État même très riche est dans l'incapacité financière d'indemniser une catastrophe nucléaire. Cela signifie aussi que non seulement il n'y a pas d'assurance préalable, mais encore il n'y a même pas réellement de capacité d'assumer les dommages causés aux victimes dans le cadre d'une solidarité nationale compte tenu de l'immensité des coûts que représente une catastrophe nucléaire. Ainsi, la Suisse a évalué à 4 000 milliards d'euros ce que serait le coût d'une catastrophe nucléaire sur son territoire.

Les Français n'ont jamais été interrogés sur leur acceptation d'une telle orientation. Pourtant, un débat de cette nature aurait été d'autant plus intéressant que la dette publique potentielle s'est en réalité « enrichie » du coût du démantèlement des centrales et du coût du traitement à long terme des déchets. En France en particulier, pour avoir refusé de faire payer à l'électricité nucléaire la réalité de son coût, dans la mesure où un bas prix de l'électricité faisait partie des « arguments de vente » en faveur du nucléaire (même si le prix actuel

4. Convention sur la responsabilité civile dans le domaine de l'énergie nucléaire, signée en 1960 (NDLR).

de l'électricité en France n'est de loin pas le meilleur marché d'Europe, il est dans la moyenne basse des prix européens et cette situation est en train de changer en raison des hausses continues du prix de l'électricité), les provisions prévues pour le démantèlement des centrales et pour le traitement des déchets sont dérisoires.

Ainsi, les sommes provisionnées par EDF (qui ne le sont plus réellement depuis le tour de passe-passe de la loi de finances de 2010) s'élevaient à 15 milliards d'euros ; la Cour des comptes avait évalué en 2003 à près de 35 milliards d'euros le coût du démantèlement. Nous sommes en réalité très loin du compte ; avec les méthodes d'évaluation anglaises ou suédoises, le coût du démantèlement des 58 réacteurs français devrait plutôt se situer entre 100 et 200 milliards d'euros⁵. S'ajoute à cela le coût du traitement à long terme des déchets. La réalisation d'un centre de stockage souterrain serait passée de 15 à 35 milliards d'euros, ce qu'EDF refuse de payer.

En conséquence, les citoyens acceptent bien un risque financier, humain, économique, qu'ils ne mesurent pas, pour la bonne et simple raison qu'il leur a été caché, et qu'ils ne peuvent en réalité pas assumer. Sans cet escamotage, qui constitue un scandale démocratique, le nucléaire n'aurait jamais été installé en France.

Investir dans les énergies renouvelables

Mais cette seule circonstance pourrait n'être pas suffisante pour remettre en cause un choix qui a été

fait. En effet, on pourrait soutenir que l'avantage compétitif dont dispose la France du fait de sa nucléarisation extrême doit être valorisé et poursuivi. Non seulement une telle orientation ne serait pas très rationnelle au regard de ce qui précède, mais encore elle pourrait devenir rapidement catastrophique sur un plan industriel et économique. Il n'est en effet pas très rationnel de risquer la totalité de l'activité économique d'un pays, la richesse de son patrimoine, et surtout la santé et la sécurité de ses habitants au bénéfice d'une technologie énergétique, quelle qu'elle soit. Mais surtout, l'heure est aujourd'hui à l'efficacité énergétique et aux énergies renouvelables.

Il faut tout d'abord souligner le fait que seules les énergies renouvelables assurent une totale indépendance énergétique. Le vent, le soleil, la biomasse, l'énergie des mers qui nous bordent nous sont offerts et ne peuvent nous être retirés par personne. Il n'en va pas de même de l'uranium que nous ne possédons pas en termes de matières premières, et dont l'extraction a des conséquences si graves sur la santé et l'environnement qu'il est plus que souhaitable de se préserver de toute exploitation. Ensuite, les énergies renouvelables sont en capacité, malgré le bourrage de crâne et la désinformation dont les Français font l'objet, de fournir progressivement la majorité des besoins énergétiques du pays. La France est le pays à plus fort potentiel cumulé d'énergies renouvelables en Europe. Pourtant, elle reste désespérément en queue de peloton avec 15 % d'énergies renouvelables dont 13 % issus

5. Voir aussi l'article de Pierre Bonnaure, « Le démantèlement des installations nucléaires en France ». *Futuribles*, n° 370, janvier 2011, pp. 45-56 (NDLR).

de l'hydroélectricité. Le « plus de nucléaire possible » a en effet tué le développement d'un secteur industriel d'énergies renouvelables puissant, sans pour autant que l'industrie nucléaire ne crée beaucoup d'emplois. Avec 100 000 emplois annoncés aujourd'hui dans le secteur nucléaire, sous-traitants y compris, la France fait pâle figure à l'égard de l'Allemagne qui compte aujourd'hui plus de 350 000 salariés dans le secteur des énergies renouvelables, dont les deux tiers correspondent à des emplois nouvellement créés. Or, il existe en réalité une incompatibilité entre le développement massif de filières d'énergies renouvelables et de filières permettant l'efficacité énergétique d'une part, et le nucléaire d'autre part.

En effet, tant que l'électricité ne se stocke pas, toute l'électricité produite doit être consommée. EDF, qui dispose aujourd'hui d'une surcapacité en dehors des périodes de pointe, doit impérativement vendre son courant. Elle ne peut donc accepter la concurrence d'autres formes d'électricité, *a fortiori* si elle doit racheter l'électricité produite. Cette incapacité est d'autant plus grande aujourd'hui que la situation financière d'EDF est mauvaise, voire très mauvaise et qu'en conséquence, elle a le plus grand mal à faire face aux investissements qui doivent être consentis. C'est la raison pour laquelle toute sa stratégie ne vise qu'à faire payer par le contribuable, à terme, les dépenses qu'elle ne parvient pas aujourd'hui à assumer.

Ainsi, malgré un rapprochement croissant entre le prix de revient du

kilowattheure nucléaire et le prix de revient du kilowattheure éolien, qui aboutira dans quelques années à rendre le prix du kilowattheure éolien plus avantageux que celui du kilowattheure nucléaire, malgré une baisse tendancielle du prix de revient du kilowattheure solaire et les espoirs mis dans les centrales à concentration (y compris celles qui sont réalisées hors de France mais qui pourraient alimenter très aisément le pays), la France refuse de se diriger vers un réel *mix* énergétique. La vérité est qu'en matière d'électricité, il n'y a pas de *mix* énergétique puisque le nucléaire représente près de 80 % de l'électricité française et que le gouvernement veut maintenir sa théorie du plus de nucléaire possible. Ce faisant, la France est en passe de rater le train de la troisième révolution industrielle qui se met en marche de manière inéluctable.

Un rapport du GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) paru au mois de mai⁶ propose plusieurs scénarios dont l'un permettrait à l'humanité de disposer d'ici 2050 d'une couverture à hauteur de 80 % de ses besoins énergétiques par les énergies renouvelables. Pour y parvenir, le problème n'est pas technique ; il est politique et financier puisqu'il s'agit d'investir suffisamment pour mettre en place des technologies existantes. Le coût, en toute hypothèse, ne devrait pas être supérieur à 1 % du produit intérieur brut. Pour un coût aussi modique (rappelons les évaluations du rapport Stern sur l'énorme coût financier du changement climatique en cas de non-inflexion de nos choix éner-

6. *Special Report on Renewable Energy Sources (SRREN): Summary for Policymakers*. Genève : GIEC, mai 2011. Voir l'encadré en page 46 de ce numéro (NDLR).

gétiques ⁷), il est plus que probable que tous les pays industrialisés et les pays émergents fassent de cette troisième révolution industrielle le moteur de leur développement économique. Dans une telle hypothèse,

le choix français de se focaliser sur le tout-nucléaire en relançant un nouveau programme nucléaire serait suicidaire sur le plan du risque comme sur les plans économique et industriel. ■

7. Voir STERN Nicholas (sous la dir. de). *The Stern Review: The Economics of Climate Change*. Londres : Her Majesty Treasury, 2006 (analysé dans *Futuribles* par Olivier Godard, in « L'économie du changement climatique. Le rapport Stern un an après ». N° 334, octobre 2007, pp. 25-42) (NDLR).

L'énergie nucléaire après Fukushima

PAR BERNARD BIGOT ¹

Le 11 mars 2011, le Japon était victime d'un séisme de très forte magnitude, suivi d'un tsunami qui fit des milliers de morts dans la région de Sendai, et qui eut surtout pour conséquence une catastrophe nucléaire majeure dans la centrale de Fukushima. Cet accident a été classé au plus haut degré de gravité sur l'échelle internationale des événements nucléaires, ce qui en fait le plus important depuis celui de Tchernobyl en 1986. Il est encore impossible de mesurer l'ampleur exacte des conséquences de cette catastrophe, mais il est clair qu'elle a relancé les débats les plus vifs sur la question nucléaire.

Futuribles s'en fait l'écho dans la rubrique « Forum » de ce numéro estival intégralement consacré aux questions énergétiques. Bernard Bigot, administrateur général du CEA, revient sur cette catastrophe et sur ce que cela change (ou pas) s'agissant du recours à l'énergie nucléaire, en France notamment. Après avoir rappelé les leçons des précédentes catastrophes nucléaires, qui ont conduit à la mise au point de la troisième génération de centrales, il rappelle la nécessité aujourd'hui incontestée de s'affranchir de la dépendance aux énergies fossiles, qui passe certes par un recours accru aux énergies renouvelables, mais à laquelle on ne pourra guère faire face sans l'énergie nucléaire. Enfin, s'agissant de la catastrophe de Fukushima, Bernard Bigot montre en quoi elle résulte davantage, selon lui, d'une erreur de management dont il faut tirer les leçons pour améliorer les conditions de sécurité des centrales existantes ou en projet, et permettre au personnel responsable d'apporter les bonnes réponses en un minimum de temps en cas d'incident ou d'accident. Dans ce contexte et compte tenu de la forte dépendance de la France à l'énergie nucléaire, le poids et le recours à cette forme d'énergie ne devraient pas pâtir des événements de mars 2011. S.D. ■

1. Professeur des universités, administrateur général du CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives).

L'accident de Tchernobyl intervenu en Ukraine, il y a exactement 25 ans, en avril 1986, avait mis en évidence pour la première fois, à la face du monde entier, les lourdes et durables conséquences sanitaires et environnementales des incompréhensibles manquements aux règles élémentaires de la sûreté nucléaire commis par les exploitants d'une centrale. Cet événement majeur, après l'accident de Three Mile Island, survenu sept ans plus tôt, lui sans conséquences radiologiques, avait conduit beaucoup d'entreprises productrices d'électricité comme de responsables politiques, sensibles à l'état d'inquiétude d'une large fraction de l'opinion publique et aux risques de tous types encourus, y compris financiers, à ne plus envisager la construction de nouvelles centrales nucléaires au-delà des quelque 450 alors en fonctionnement.

Certains pays décidaient même de fermer les installations existantes plus tôt que ne le permettait leur durée de vie prévue. Quelques pays dans le monde dont la France, la Chine, la Corée du Sud, le Japon..., poursuivaient avec continuité les programmes de construction engagés et l'exploitation des centrales existantes, en veillant à tirer, au plan de la sûreté, toutes les leçons des deux accidents mentionnés comme de l'expérience progressivement accumulée par l'ensemble des exploitants nucléaires au cours de plusieurs décennies.

Les leçons de Tchernobyl...

C'est dans cette logique que de nouveaux modèles de réacteurs, dits

de troisième génération², ont alors été conçus, en France, en Allemagne, en Russie ou encore aux États-Unis et au Japon, afin de répondre à une triple exigence tirée de cette douloureuse expérience collective :

— Réduire, par conception à un niveau au moins 10 fois plus faible que la précédente génération de réacteurs, la probabilité de l'accident majeur qui est la fusion des combustibles nucléaires disposés dans le cœur du réacteur ou dans les piscines d'entreposage. Il convient de savoir qu'après l'arrêt de la réaction nucléaire en chaîne qui est à la base de la production de la chaleur qui fera tourner la turbine, le combustible partiellement usé dégage une quantité de chaleur, certes beaucoup plus faible (50 fois moins après une heure d'arrêt, 200 fois moins au bout de 24 heures), mais encore suffisante pour porter les combustibles à plus de 2 500 °C au bout de quelques heures en l'absence des moyens d'extraction de cette chaleur résiduelle du réacteur, et ainsi conduire à la fusion du combustible et de la gaine qui confine les « cendres », c'est-à-dire les produits hautement radioactifs de fission. Ceci conduit à leur relâchement dans l'enceinte du réacteur et à une production d'hydrogène qui entraîne surpression et risque d'explosion chimique. Il faut donc absolument préserver, en toutes circonstances, une source de refroidissement offrant une puissance d'extraction de chaleur adaptée.

— Renforcer de manière significative la capacité de résistance de la centrale à des événements naturels extrêmes, même les moins probables

2. Sur ces aspects techniques, voir notamment CARRÉ Frank et PETIT Jean-Claude. « Nucléaire : la génération IV. Les enjeux des nouvelles générations de centrales nucléaires ». *Futuribles*, n° 315, janvier 2006, pp. 79-101 (NDLR).

(tremblements de terre, tempêtes, inondations, températures extrêmes...) ou aux conséquences d'actes de malveillance (chute d'objets volants, actes de terrorisme...).

— Prévenir tout risque, en toutes circonstances, de relâchement de matières radioactives dans l'environnement au-delà des limites du site nucléaire, par des enceintes successives particulièrement robustes, en supposant même que survienne un de ces événements très improbables évoqués ci-dessus.

La nécessité de s'affranchir des énergies fossiles

La disponibilité sur le marché de ces nouveaux équipements aux alentours des années 2003-2008 a coïncidé avec trois phénomènes :

— La prise de conscience par l'opinion publique mondiale de l'impact négatif croissant sur l'environnement et la santé qui résulte de l'usage massif des énergies d'origine fossile, et des risques sur l'environnement et de changement climatique dus aux émissions de gaz à effet de serre et autres polluants associés. C'est ainsi que les négociations internationales, quoique très imparfaites, ont conduit plusieurs pays à prendre des engagements ambitieux de réduction de ces émissions à court et moyen termes.

— L'existence de plusieurs événements géopolitiques dans les pays producteurs d'hydrocarbures qui ont mis en évidence la dépendance croissante du reste du monde à leur égard et la menace de raréfaction rapide de ces ressources fossiles, conduisant à une inéluctable augmentation des prix des produits pétroliers et gaziers. Songeons qu'entre 2003 et 2008, en moins de cinq ans, de nombreux

pays dans le monde, dont la France, ont vu le coût de leurs importations de matières premières énergétiques doubler.

— La démonstration que les technologies de production d'énergie renouvelable, dont le déploiement est pourtant partout souhaitable, ne sauraient seules répondre à la demande mondiale d'énergie, et ce en dépit des progrès accomplis grâce à la recherche en termes de rendement et en termes de coûts. Dans nos sociétés nécessairement urbaines et industrielles au vu des populations concernées, l'adéquation instantanée entre offre et demande est incompatible avec le caractère intermittent et diffus des seules énergies renouvelables, aussi longtemps que les technologies de stockage de l'électricité ou de la chaleur connaîtront les limites dimensionnelles et temporelles actuelles. Ceci sera d'autant plus limitant que l'on ira vers des politiques d'économie d'énergie rigoureuses. Dans tous les cas, il est nécessaire de disposer d'une capacité de production continue d'électricité et offrant les puissances requises que seules peuvent fournir les énergies nucléaires ou fossiles.

Forts de ces constats, de nombreux pays ont alors à nouveau porté leur regard, dans les années 2005 et au-delà, vers les avantages qu'offre l'énergie nucléaire pour cette production de base puisque les énergies fossiles étaient confrontées aux handicaps évoqués ci-dessus. Certains même, perdant la mémoire des accidents passés et au vu des performances nucléaires remarquables de plusieurs pays illustrant tout le bénéfice en termes économiques, environnementaux et de réduction de la dépendance, auquel un choix de politique nucléaire pouvait conduire, ont esti-

mé que les exigences de sûreté accrues adoptées pour les réacteurs de troisième génération, avec les coûts supplémentaires et la complexité de construction auxquels cela pouvait conduire par rapport à la génération précédente, ne se justifiaient pas. À leurs yeux, construire de nouveaux exemplaires de réacteurs de la génération actuelle convenait très bien.

Au début du mois de mars 2011, une quarantaine de pays nouveaux entrants étaient concrètement engagés dans un processus plus ou moins avancé d'évaluation ou de mise en œuvre d'un programme de production électronucléaire adapté à leur situation particulière. Certes, le nombre de décisions de construction de réacteurs de troisième génération effectivement prises était encore de quelques unités, mais il n'y avait là rien d'étonnant en raison des délais incompressibles pour instruire une telle décision, qui engage le pays d'accueil pour au moins un siècle d'intervention humaine directe avant d'envisager le complet assainissement et démantèlement de l'installation, et le stockage des déchets radioactifs dans des conditions définitivement sûres. L'amélioration des performances d'industrialisation, de son côté, progressait à nouveau dans le monde, puisque s'il y avait trois centrales en construction en 2003, début 2011 il y en avait 24, et 38 autres étaient en projet avancé.

L'accident de Fukushima, une erreur de management

C'est dans ce contexte qu'est survenu l'accident de la centrale de Fukushima. Remet-il en cause cette dynamique et plus généralement la technologie nucléaire ? Oui, bien sûr, cet accident ne peut laisser personne indifférent et conduit à s'interroger de

manière approfondie sur ses raisons et ses conséquences, localement au Japon, comme dans le monde entier. Il invite à un audit systématique de toutes les centrales en fonctionnement pour vérifier leur robustesse face à des événements extrêmes. Mais il est peu probable qu'au-delà d'un inévitable ralentissement, l'accident japonais remette fondamentalement et durablement en cause le développement de la technologie nucléaire en France et dans de nombreux autres pays. Il n'en reste pas moins qu'il faut être particulièrement attentif à tirer sans délais toutes les leçons de ce nouvel accident, pour assurer désormais, en toutes circonstances, même les plus improbables, la sûreté des installations et l'absence de rejets radioactifs dans l'environnement.

Les raisons fondamentales qui avaient conduit de nombreux pays à adopter ou à envisager cette énergie avant Fukushima, n'ont pas changé et ne feront que prendre plus de poids dans les décennies à venir. Le nucléaire est nécessaire dans de nombreux pays. L'exigence nouvelle, c'est un renforcement et une harmonisation mondiale des *standards* de sûreté, au niveau à la fois de la conception des installations, mais surtout peut-être de l'organisation et de la compétence des exploitants et de l'ensemble de la chaîne de sûreté.

En effet, s'il est encore trop tôt pour tirer des conclusions définitives des événements du Japon, les éléments dont nous disposons aujourd'hui montrent qu'en dépit d'événements naturels extrêmes — un tremblement de terre de force 9 et un *tsunami* d'une intensité exceptionnelle —, l'intégrité physique des réacteurs de Fukushima, pourtant construits dans les années 1970, a été totalement pré-

servée. Les réacteurs se sont arrêtés comme prévu et sans dommages suite au séisme. Les marges prises en termes de conception du cœur nucléaire se sont révélées pertinentes. L'origine de l'accident a été l'impossibilité dans laquelle se sont trouvés les responsables de faire face à la perte totale des moyens de refroidissement des combustibles usés, une fois la réaction nucléaire à l'arrêt, suite à l'inondation de la partie électrique et donc à l'insuffisante disponibilité des systèmes de secours de production d'électricité, quitte à solliciter en urgence le transport sur place par les forces armées de quelques générateurs électriques mobiles.

Car même après l'arrêt de la réaction nucléaire, il faut en effet extraire la chaleur résiduelle qui est produite par les combustibles usés, de l'ordre de 0,2 % de la chaleur produite par le réacteur en fonctionnement. Et si vous n'avez pas les quelques mètres cubes d'eau et l'électricité nécessaires pour faire fonctionner les pompes du circuit de refroidissement, la température des combustibles usés peut atteindre rapidement plus de 2 500°C, et altérer et faire fondre la gaine des combustibles, relâchant alors des produits radioactifs et de l'hydrogène dans l'enceinte qui, à son tour, si on ne prend pas les mesures adéquates, peut produire une explosion chimique dévastatrice. La destruction des bâtiments que le monde entier a pu observer est liée à cette explosion d'hydrogène, pas à une explosion nucléaire. C'est donc le volet organisationnel de l'exploitation en cas de crise grave qui a fait véritablement le plus défaut. Il semble bien qu'après avoir passé l'étape du séisme et du *tsunami* dans les conditions que l'on connaît, l'accident tel que constaté aujourd'hui était évitable si les dé-

cision souhaitables avaient été prises dans un intervalle de six à huit heures après le *tsunami*.

*
**

Un pionnier du nucléaire disait à juste titre que « le nucléaire civil n'est pas dangereux aussi longtemps que l'on pense qu'il peut l'être beaucoup », c'est-à-dire qu'il faut absolument avec l'habitude éviter que l'on pense que c'est une technologie banale. Soyons lucides, aucune conception n'est à l'abri de l'accident ; une conception adaptée peut en réduire fortement les effets. Mais c'est la combinaison d'une conception exigeante en termes de sûreté et d'un haut niveau de formation, et d'entraînement, des exploitants et de l'ensemble de la chaîne de décision dans toutes les situations envisageables, qui est le meilleur rempart contre l'accident et la limitation des impacts s'il survient.

Les raisons qui peuvent justifier, dans le contexte actuel, qu'un pays choisisse de faire appel à l'énergie nucléaire n'ont pas changé. Prenons l'exemple de la France. Le choix nucléaire vient du constat que la France n'a pratiquement plus de ressources domestiques. Sans le nucléaire, elle devrait importer plus de 92 % de sa consommation primaire d'énergie. Avec le nucléaire, elle se situe encore à 50 % de dépendance des marchés extérieurs de produits pétroliers et gaziers. Avec toute la fragilité que cela entraîne.

Songez qu'en 2003, la France importait pour 23 milliards d'euros de ces produits. En 2008, elle est passée à 48 milliards d'euros quand le baril de pétrole a atteint 143 dollars US l'unité, et en 2010 ce fut encore 46 milliards. Cela signifie qu'en 2008,

chaque Français a dû affecter près d'un quart du temps qu'il a consacré à l'exportation pour couvrir le coût de ces importations, alors que c'était moins d'un dixième en 2003. Sans le nucléaire, ce serait le double, c'est-à-dire que ce serait proprement insupportable au plan de la balance des échanges commerciaux de la France avec l'étranger. Sans parler de la possibilité de la non-disponibilité physique de ces produits en France pendant plusieurs semaines ou plusieurs mois en cas de crise géopolitique.

Le nucléaire se justifie parce qu'il répond dès maintenant à une nécessité pour les pays qui n'ont pas ou plus de ressources fossiles et qui veulent anticiper l'inéluctable raréfaction, renchérissement des coûts et *in fine* dépendance vis-à-vis d'une ressource qui assure aujourd'hui encore plus de 85 % de l'énergie primaire consommée dans le monde. Et leur nombre ne peut que croître. Il

faut donc incontestablement maintenir ouvert ce choix nucléaire, associé au développement des énergies renouvelables, pour autant qu'elles soient économiquement compétitives ou même simplement que leur coût soit compatible avec la part du budget que les Français acceptent de consacrer à l'énergie.

Même s'il faut développer fortement l'usage des énergies renouvelables partout où cela est possible, la nécessité de faire appel à l'énergie nucléaire ne disparaît pas avec l'accident de Fukushima. Cette nécessité ne fait que renforcer les impératifs et la tenue des exigences de sûreté connues, partout dans le monde, en rappelant la responsabilité première des États en matière d'élaboration des normes les plus exigeantes et de contrôle de leur strict respect, tout en veillant à promouvoir de manière très volontariste leur harmonisation à l'échelle internationale. ■

Les conséquences de l'accident de Fukushima

PAR MICHEL DRANCOURT ¹

Le 11 mars 2011, le Japon était victime d'un séisme de très forte magnitude, suivi d'un tsunami qui fit des milliers de morts dans la région de Sendai, et qui eut surtout pour conséquence une catastrophe nucléaire majeure dans la centrale de Fukushima. Compte tenu de sa gravité (la plus haute sur l'échelle internationale des événements nucléaires), cet accident a ravivé les débats les plus âpres entre partisans et opposants à l'utilisation de cette forme d'énergie, débats auquel Futuribles fait écho dans la rubrique « Forum » de ce numéro spécial. Michel Drancourt, sans s'inscrire d'un côté ou de l'autre des parties prenantes à ce débat, y apporte sa voix en essayant de mesurer les conséquences de cette catastrophe, pour le Japon comme pour le monde.

Il le fait en partant d'un article publié dans Futuribles il y a plus de 20 ans, présentant les conclusions d'un rapport de la Tokai Bank sur les conséquences économiques potentielles d'un tremblement de terre à Tokyo. Comme il le souligne, la situation a changé et le Japon n'occupe plus la place centrale qui était la sienne dans les échanges financiers et commerciaux des années 1980 ; néanmoins, ce pays demeure un importateur et un fournisseur majeur de bien des produits, et son affaiblissement ne sera pas sans conséquences pour le reste du monde, aux plans industriel, politique et économique. Quant à la confrontation du scénario de 1989 avec la réalité de 2011, une des leçons à en retenir est qu'il n'aurait pas été loin de la vérité si au risque sismique ne s'étaient ajoutés le tsunami et l'accident nucléaire subséquent. D'où deux conclusions à plus long terme : ne pas raisonner, dans les exercices de prospective, à risque unique isolé ; et surtout diversifier le plus possible les sources de production énergétique. S.D. ■

1. Économiste, membre du comité de rédaction de *Futuribles*.

Dans son numéro d'octobre 1989, *Futuribles* publiait un texte de la banque japonaise Tokai Bank sur les conséquences économiques d'un éventuel tremblement de terre dans la partie sud de la région de Kanto, proche de Tokyo, non seulement pour le Japon mais aussi pour le reste du monde². Depuis, deux séismes majeurs ont frappé le Japon : l'un à Kobe, le 17 janvier 1995 ; l'autre à Sendai et dans la région de Fukushima, le 11 mars 2011. C'est à celui-ci que nous nous intéressons le plus aujourd'hui pour comparer les conséquences économiques qu'il entraîne et entraînera au scénario présenté par la Tokai Bank il y a un peu plus de 20 ans.

Si Tokyo tremblait...

Le rapport de la Tokai Bank³ mettait l'accent sur l'importance de la région de Tokyo : un produit brut de 730,7 milliards de dollars US, représentant 30 % du produit japonais, alors le deuxième du monde. Les activités liées à la finance, à l'assurance, aux transports et aux télécommunications y jouaient un rôle majeur. Le traitement de l'information et sa circulation étaient très concentrés (les médias représentaient 30 % de l'information diffusée au Japon ; les téléphones, les copieurs et autres moyens de communication de l'époque presque 40 %).

La densité de la population, de l'argent, de l'information dans cette zone était jugée excessive par le rapport en raison des risques de dommages pour le Japon, les États-Unis et le reste du monde.

Les pertes en capital pour le Japon étaient estimées à 23 % du produit national brut (PNB) japonais de 1987 (en valeur absolue, beaucoup plus importantes que les pertes dues au tremblement de terre de Tokyo en 1923, mais inférieures en pourcentage du PNB car celui-ci s'était accru entre-temps).

Les conséquences économiques d'un séisme supposé qui se serait produit en 1988, se seraient traduites par une baisse du taux annuel de produit global fortement compensée par les dépenses de reconstruction de 1988 à 1991. On attendait, dans cette hypothèse, une forte augmentation des prix pendant trois ans, mais ceux-ci retomberaient ensuite. On prévoyait également un déficit temporaire de la balance courante en raison des importations, suivi d'une baisse de la valeur du yen. Le risque d'une crise financière était écarté : les réserves de change représentaient huit mois d'importations. De plus, à l'époque, le Japon était le plus gros créancier mondial et dégageait un énorme surplus commercial. Le pays aurait tout de même été contraint de réduire les sorties de capitaux et d'en rapatrier. Conséquence : hausse des taux d'intérêt américains, ce qui aurait entraîné une récession aux États-Unis et des difficultés dans de nombreux pays.

La conclusion de l'étude insistait sur le thème qu'elle avait manifestement pour but de faire admettre, celui de la nécessité de transférer des activités et des sièges sociaux en dehors de la région de Tokyo.

2. TOKAI BANK. « Si Tokyo tremblait... Les conséquences économiques d'un tremblement de terre au Japon ». *Futuribles*, n° 136, octobre 1989, pp. 25-35.

3. Dont l'article paru dans *Futuribles* donnait un résumé.

Maintenant, il s'agit de comparer les conséquences de ce qui s'est produit depuis le 11 mars dernier au Japon et celles de ce qui aurait pu se produire dans la région de Tokyo en 1988. Ainsi, plusieurs changements majeurs sont intervenus depuis, et l'ampleur du séisme est, par ailleurs, bien plus considérable que celle envisagée alors, notamment en raison de la catastrophe nucléaire consécutive au *tsunami*.

Des changements majeurs

Le premier changement tient à l'importance et au rôle du Japon dans l'économie mondiale. Dans les années 1980, le pays était encore *leader* industriel du monde développé et deuxième puissance économique. Ses entreprises et ses produits étaient de plus en plus présents sur le marché américain. Les gains à l'exportation, prêtés ou réinvestis en dollars US, permettaient aux Américains de financer leur déficit extérieur. Depuis, les Chinois en font autant et leur poids dans l'économie américaine et mondiale ne cesse d'augmenter. D'ailleurs, ils ont pris la deuxième place dans l'économie mondiale, repoussant le Japon à la troisième.

Les entreprises japonaises servaient de modèle aux entreprises occidentales et surtout aux ambitieuses économies d'Asie. Désormais, elles sont obligées elles-mêmes de s'adapter à de nouvelles données de concurrence fortement marquées par le « capitalisme chinois ». Cela ne veut pas dire pour autant qu'elles ne comptent pas. Depuis le séisme du 11 mars et ses

suites, on prend conscience d'une réalité que l'on n'avait pas bien perçue. On voyait l'économie japonaise stagner. On ne voyait pas la place qu'occupaient encore nombre de ses activités et entreprises dans le fonctionnement de l'économie mondiale et, en particulier, dans celui de l'ensemble asiatique de l'ASEAN (Association des nations d'Asie du Sud-Est). Le Japon contribue à raison de 11 % à la création de la valeur ajoutée du secteur manufacturier mondial. Ses entreprises sont notamment très présentes dans des activités majeures comme celles de l'industrie automobile et des hautes technologies ⁴.

Les effets de la catastrophe sont d'autant plus difficiles à estimer que les secousses sismiques et le *tsunami* ont provoqué un désastre nucléaire mal maîtrisé, sans oublier la destruction massive de maisons, une série d'incendies et de destructions d'installations pétrolières, chimiques et autres, dont les répercussions risquent de se faire sentir longtemps dans plusieurs zones agricoles et maritimes. « Ce qui change tout, déclare Patrick Lagadec, directeur de recherche à l'École polytechnique, c'est l'accumulation des événements. D'abord le tremblement de terre, puis le *tsunami*, maintenant le risque nucléaire... ⁵ »

Les conséquences de cette triple catastrophe sont économiques et financières, relatives à l'organisation industrielle, politique et normative. Mais il faut aussi mettre l'accent sur les conséquences humaines et sociales, difficiles à appréhender dans des statistiques et dont les effets seront peut-être plus lourds — au Japon

4. LUPTON Joseph, HENSLEY David. « Global Repercussions from the Japanese Earthquake ». *J.P. Morgan Global Issues*, 25 mars 2011, 16 p.

5. *In Les Échos*, 14 mars 2011.

et dans le monde — que ceux qui se mesurent à la virgule.

Les conséquences humaines et sociales

Au Japon d'abord. La plupart des commentaires sur le comportement des Japonais le 11 mars et ensuite ont mis l'accent sur leur sang-froid. Mais les semaines passant, on constate que l'irritation monte contre les pouvoirs publics et surtout contre la direction de TEPCO (Tokyo Electric Power Company), la firme responsable des centrales nucléaires directement atteintes par le tremblement de terre, les répliques et surtout par les effets du *tsunami* dont l'ampleur est bien plus considérable que l'avaient envisagé les constructeurs des installations de Fukushima. Le Premier ministre japonais, Naoto Kan, a déclaré que la centrale numéro un devrait être mise hors service et démantelée. Il a déclaré aussi que le projet de construction, d'ici à 2030, de 14 nouvelles centrales ferait vraisemblablement l'objet d'un nouvel examen.

Sans préjuger des grandes orientations de la politique énergétique japonaise à venir, ni de celle de nombreux pays qui ont été frappés par la vulnérabilité aux accidents nucléaires d'un pays très industrialisé que l'on croyait exemplaire, on peut tout de même retenir une hypothèse forte : d'une part un contrôle accru des centrales existantes, d'autre part la nécessité de hisser la recherche d'énergies renouvelables au niveau des enjeux réels.

Aujourd'hui, le trio pétrole-charbon-gaz représente 87 % de l'offre mon-

diale d'énergie, les renouvelables 7 %, le nucléaire 6 %. L'Agence internationale de l'énergie, qui avance ces chiffres, estime qu'en 2035 les énergies carbonées — dont les réserves ne sont pas illimitées — représenteront 78 % de l'offre, les renouvelables 14 % et le nucléaire 8 %. Même si ces chiffres sont discutables, ils confirment cependant une réalité : la nécessité d'investir fortement dans la recherche et la production de sources d'énergie abondantes et le moins polluantes possible.

Or, le nucléaire — par fusion — est considéré, avec le solaire, comme l'une des deux solutions les plus intéressantes à long terme — beaucoup plus fiable que le nucléaire par fission⁶. Si sa maîtrise technique n'est pas réalisée, ou bien le nucléaire actuel sera encore nécessaire longtemps, ou bien les prix des énergies « acceptables » seront très élevés, même si la productivité énergétique progresse, en raison des besoins de milliards de consommateurs.

Ces perspectives peuvent paraître assez éloignées des préoccupations japonaises du moment, de reconstruction de zones entières, de neutralisation des risques nucléaires, de santé de milliers de personnes, et de relance de l'activité, mais elles s'inscrivent dans la durée.

À chaque catastrophe nucléaire, des mouvements d'opposition au nucléaire se produisent et cependant, de nouvelles centrales se construisent. Mais on constate tout de même qu'après l'accident de Three Mile Island, le 28 mars 1979 — beaucoup moins grave que l'actuel —, les États-Unis ont arrêté leurs équipements.

6. Voir le livre d'André Lebeau, *Les Horizons terrestres. Réflexions sur la survie de l'humanité* (Paris : Gallimard [Le Débat], 2011).

Ils étaient en train de les relancer, mais il n'est pas sûr qu'ils poursuivent dans cette voie, d'autant qu'après un arrêt de 30 années il faut retrouver des techniciens. Après Tchernobyl, le débat sur les contrôles nécessaires s'est renforcé. Ce sera certainement la politique préconisée désormais, y compris en Chine et en Inde. Les activités liées à l'énergie nucléaire se poursuivront, ne serait-ce que parce qu'elles sont indispensables dans de nombreux pays et que le démontage des centrales existantes prend des années ⁷.

Il est vrai aussi que de nombreux commentaires parus à ce jour sur les suites des catastrophes japonaises ont dit qu'elles ne menaçaient pas la reprise économique mondiale. Certes, la plupart admettaient que des évolutions de mode de vie se produiraient à terme, mais pour reprendre l'expression d'un expert boursier : « événement aux conséquences lourdes mais pas "boursièrement" parlant ⁸ ». Celui-ci ne niait pas les drames humains ni les prises de conscience accrues des exigences énergétiques, mais il pensait, comme d'autres experts, que l'impact sur l'économie japonaise serait peut-être positif à terme (le rebond), et relativement faible sur l'économie mondiale. Une fois de plus, les points de vue peuvent différer selon l'échelle de temps choisie. En voici d'autres illustrations.

Les stratégies managériales

Nous avons déjà noté que le désastre japonais avait fait découvrir des réalités oubliées, un peu comme

la marée basse fait apparaître des reliefs invisibles à marée haute. Des retards de livraison de composants essentiels en provenance du Japon sont à prévoir pendant quelque temps encore. Les entreprises japonaises fournissent par exemple 20 % des composants destinés aux ordinateurs, 60 % des plaques de silicium utilisées pour les fabriquer, et de très nombreux éléments d'équipement pour les automobiles ou les machines. Les entreprises japonaises sont elles-mêmes victimes de ces difficultés de livraison. C'est notamment vrai dans l'automobile, mais Toyota ou Nissan ont des usines dans d'autres pays et leurs fournisseurs ne sont pas tous japonais. Des effets de substitution sont prévisibles.

Par ailleurs, les conséquences des secousses sismiques et du *tsunami* ne seront pas négligeables, en dehors même du choc nucléaire dont les dégâts sont difficiles à apprécier dans leur ampleur. Les premières estimations situent à 4 % la ponction possible sur le produit intérieur brut japonais (le séisme de Kobe avait réduit de 2 % sa croissance en 1995). Ce n'est pas négligeable mais, hors dégâts nucléaires, cela peut se rattraper dans les années suivantes. L'impact sur le commerce international sera plus visible en Asie (pour la Chine, le Japon représente 13 % des importations et 8,1 % des exportations ; pour la Malaisie ou l'Indonésie, c'est nettement plus). Mais les importations japonaises en énergie pour compenser la réduction du nucléaire peuvent aussi peser sur les prix du pétrole, du gaz ou du charbon.

7. Voir aussi BONNAURE Pierre. « Le grand retour du nucléaire ? » et « Le démantèlement des installations nucléaires en France ». *Futuribles*, n° 370, janvier 2011, respectivement pp. 31-44 et pp. 45-56 (NDLR).

8. Marc Renaud, président de Mandarine Gestion, dans *Les Échos* du 2 avril 2011, p. 21.

Tous ces facteurs seront mesurables. Ce qui l'est moins c'est l'influence possible sur le « système Ohno » qui a fortement inspiré l'industrie de nombreux pays depuis les années 1980. Le système zéro défaut, zéro stock, zéro retard, ne fonctionne que si tous les intervenants prévus sur une chaîne de production fournissent leur contribution à l'heure et aux conditions prévues. Si des accidents de parcours se multiplient, la formule est à revoir. La catastrophe japonaise vient s'ajouter à d'autres accidents et facteurs divers (grèves, par exemple) non prévus dans le modèle. Il ne disparaîtra pas mais il est appelé à évoluer, d'autant que si faire parcourir des milliers de kilomètres à des outils ou des composants ne grevait pas beaucoup les prix, il en irait autrement au fur et à mesure que le coût des carburants gonflera.

Les effets politiques

Le premier effet politique, vu de France et d'Allemagne, est le renforcement des oppositions écologistes au nucléaire. Dans de nombreux pays, y compris les États-Unis, on ne peut pas nier l'existence de risques majeurs. On a calculé que si la région de Los Angeles subit la catastrophe qu'on annonce comme inévitable à terme incertain, il en coûtera, en dégâts matériels, au moins 1 600 milliards d'euros (beaucoup plus que le coût du désastre japonais actuel qu'on estimait fin mars 2011 à 200 milliards d'euros, chiffre tout à fait incertain, il est vrai).

Certains diront que le monde est si peuplé désormais que même des séismes considérables, y compris en nombre de morts, finiraient par être digérés. Économiquement, peut-être. Mais politiquement ? Les secousses

comme celles que subit le nord du Japon vont renforcer la demande de contrôle des entreprises, multiplier les actions pour orienter les économies, ici la recherche d'un autre mode de vie, là la maîtrise des sources d'énergie et de matières premières (la Chine). Partout, on s'interrogera sur la capacité des gouvernements démocratiques à l'occidentale à mener des actions à long terme sans muscler leurs interventions. La France a conduit, jusqu'à il y a peu, une politique nucléaire de manière technocratique. Elle sera obligée de la faire évoluer et déjà, on observe de nouveaux clivages politiques sans compter les comportements assez intégristes de personnes qui, de divers côtés, sont convaincues qu'elles sont les seules détentrices de la vérité. Ce n'est pas l'unique aspect des risques de dérives autoritaires provoqués par le désordre des opinions, mais il faut le prendre en compte.

Le scénario Tokai Bank dans la réalité

Le mérite du rapport de la Tokai Bank est d'avoir évoqué, dans les années 1980, les conséquences d'un tremblement de terre dans la région de Tokyo. Cela permet aujourd'hui de mesurer les différences entre un scénario et la réalité.

Le choc du 11 mars 2011 ne s'est pas produit près de Tokyo mais plus au nord, dans la région de Sendai. Le tremblement de terre a été d'une grande ampleur, mais le pire a été un *tsunami* d'une rare violence qui a frappé durement des populations par milliers et les installations nucléaires de Fukushima. Sans lui, les hypothèses évoquées par la banque sur les coûts des réparations à opérer et les conclusions politiques à tirer des

secousses sismiques seraient apparues réalistes, en dépit de variantes importantes entre l'étude et la réalité. On en serait aujourd'hui à évaluer les dépenses de reconstruction, à s'interroger sur leurs effets sur le produit national japonais, sur la valeur du yen et l'activité des entreprises. C'est bien ce qui se passe mais les suites du drame vont bien au-delà.

Sur le terrain économique, on l'a vu, elles font apparaître qu'en raison de l'imbrication grandissante des activités industrielles, ce ne sont pas seulement les entreprises au Japon même qui sont concernées. Elles le sont partout où les fournisseurs japonais ont une position forte, par exemple dans certains équipements automobiles ou autres. À cela s'ajoute la prise de conscience de la limite des politiques de suppression des stocks et de la trop grande dépendance à une source unique de fournitures.

Sur le terrain politique, la preuve a été administrée qu'en dépit d'une politique très développée de prévention contre les risques de secousse sismique, le gouvernement japonais est apparu hésitant dans ses réactions, même si sur le terrain les responsables concernés semblent avoir fait de leur mieux. Mais tout avait été prévu, sauf le « cygne noir » pour reprendre l'image destinée à rappeler que le pire considéré comme impensable peut aussi se produire⁹.

Dans ce cas, il s'agit des conséquences d'un *tsunami* sur des installations nucléaires jugées fiables. Elles ne l'étaient pas pour trois raisons au moins :

— La possibilité d'un *tsunami* n'était pas ignorée, mais son ampleur a dépassé les hypothèses des experts au moment de la construction de l'ensemble nucléaire de Fukushima-Daiichi appartenant au groupe électrique TEPCO.

— Quand les systèmes de refroidissement des réacteurs ont été touchés, il eût fallu, selon des spécialistes français, les noyer immédiatement, ce qui aurait entraîné leur arrêt définitif, sans espoir de récupération. Le groupe a espéré pouvoir éviter cette décision, très coûteuse mais qui aurait sans doute permis de limiter les fuites radioactives qui se sont produites.

— Troisième raison : la plupart des scénarios de crise nucléaire s'attachent à décrire un type de problème à la fois, et à le faire sur une période relativement limitée dans le temps. Or, dans la réalité, plusieurs risques sont apparus en même temps, et leurs effets sont appelés à perdurer pendant des mois et des années.

Autrement dit, en dépit de l'accident de Tchernobyl en 1986, on avait tendance à faire confiance aux techniciens, surtout dans un pays comme le Japon, pour faire face rapidement aux imprévus. Or, même au Japon, ceux-ci n'y sont pas parvenus. Incidemment, aux États-Unis, après l'accident de Three Mile Island, les programmes nucléaires ont été stoppés pour longtemps et le sont toujours. Précaution ? Sans doute. Il est vrai que les États-Unis font appel à des énergies variées, y compris le charbon, même si elles sont plus polluantes, parce que la crainte des gaz à effet de serre n'y est pas aussi

9. Voir notamment GRANRUT Charles (du). « Comment penser l'imprévisible ? À propos du livre de Nassim Nicholas Taleb, *The Black Swan* ». *Futuribles*, n° 336, décembre 2007, pp. 5-13 (NDLR).

répandue qu'en Europe et que, surtout, les prix des énergies carbonées y étaient et sont encore nettement plus faibles. De plus, l'exploitation, discutée mais réelle, des gaz de schiste compense en partie la chute des productions locales d'hydrocarbures.

Qu'en sera-t-il désormais ? Même si dans quelques mois on peut avoir le sentiment que la crise japonaise est en passe d'être surmontée, elle a et continuera d'avoir une influence sur le choix des politiques énergétiques qui ne sont pas sans conséquences sur les choix économiques en général. On le voit en Allemagne où les antinucléaires pèsent désormais sur les décisions gouvernementales. Cela n'empêche pas les Allemands d'acheter, pour combler le vide, de l'électricité produite en France grâce en grande partie au parc de centrales nucléaires.

D'une façon générale, la catastrophe japonaise aura pour conséquence de renforcer les mesures de contrôle des équipements nucléaires, là où ils existent ou sont en construction. On examinera plus objectivement la réalité de leur coût. Ce sera aussi, ou cela devrait être, l'occasion d'une réflexion réellement prospective sur l'énergie, son importance dans un monde dont la population a explosé en un siècle et continue de croître à vive allure, sur la dimension mondiale du défi. On devrait enfin intégrer dans les approches politiques internationales les risques des catastrophes « globales », les moyens de les prévenir ou d'en réduire l'ampleur. Comme l'écrit Denis Kessler¹⁰ avec l'autorité de l'économiste et du réassureur : « Il y a des événements globaux qui ébranlent le monde entier

et qui ont des répercussions dans tous les pays. » Le constat devrait inspirer aux acteurs des grandes réunions sur le développement durable, à Durban fin 2011 et surtout à Rio en juin 2012, des orientations à caractère réellement universel. Utopie ? Peut-être, mais la véritable utopie n'est-elle pas de faire croire que les frontières sont une garantie contre les catastrophes globales.

Le long terme

Qu'en est-il du plus long terme ? Dans une approche des sources d'énergie largement fondée sur l'évolution des prix et la variété des sources, on multipliera les investissements à court terme. La réalité des prix est et sera souvent plus ou moins faussée par les pressions écologiques. Là où elles sont fortes, comme en Allemagne ou dans certaines régions américaines, elles jouent en faveur des énergies renouvelables chères. Leur mise en œuvre exige généralement beaucoup de financement et de subventions. La politique de l'énergie peut alors se transformer en champ de courses aux subventions, pour l'éolien, pour le solaire, pour les biocarburants, pour les biomasses, etc. Le nucléaire ne disparaîtra pas pour autant mais sera enserré dans des obligations de contrôle et d'assurance qui ne sont envisageables, dans la durée, que dans des pays capables de les appliquer et de les financer.

Le jour où l'énergie d'origine nucléaire pourrait être produite par les procédés liés à la fusion (et non à la fission), il en irait autrement. Mais — on l'a noté — les incertitudes pesant sur sa faisabilité sont telles qu'il

10. Voir *Challenges*, n° 250, 31 mars 2011.

ALLEMAGNE : LE PRÉTEXTE FUKUSHIMA

La décision allemande de renoncer à la production d'énergie nucléaire sur son sol, annoncée fin mai 2011, était prévisible. Elle a été accélérée par l'accident de Fukushima. Dans l'immédiat elle aura vraisemblablement trois conséquences :

— Le risque de coupures d'alimentation électrique dans les régions européennes dont les réseaux sont connectés en cas d'augmentation forte de la demande.

— La hausse du prix du gaz et du charbon qui alimenteront les centrales allemandes pour compenser la fermeture des centrales nucléaires, en attendant que les énergies renouvelables soient en mesure de faire face aux besoins que, dans les prévisions allemandes, elles sont censées couvrir.

— Un accroc majeur — en raison du poids de l'énergie dans le fonctionnement des sociétés contemporaines — dans la recherche d'une politique économique réellement européenne, même s'il est vrai que l'accident de Fukushima conduira tous les pays, y compris la France, à diversifier leurs sources d'énergie.

À plus long terme, la décision allemande pourrait avoir des effets d'une autre nature :

— Elle contribuera au réchauffement de la planète en raison du recours accru au charbon (gros producteur de CO₂, en rappelant que les rejets de CO₂ par habitant sont actuellement de 10 tonnes par an en Allemagne contre 6 tonnes en France).

— Elle poussera très certainement l'Allemagne à confirmer une position de *leader* dans les équipements liés au développement durable et à orienter les législations européennes en faveur de ses choix.

— Enfin, il est possible aussi qu'elle conduise certaines activités industrielles allemandes à s'implanter dans d'autres régions du monde pour ne pas subir de plein fouet l'effet des hausses des prix de l'énergie et celui des risques de pénurie d'énergie électrique. Les entreprises ont déjà fortement amélioré leur productivité énergétique en 20 ans. Certaines d'entre elles — notamment dans la chimie allemande — estiment que l'objectif de l'Union européenne de réduire la consommation d'énergie de 20 % d'ici à 2020 ne serait possible qu'en imposant une réduction de leur production.

Au-delà de ces chiffres, il faut s'intéresser au vrai problème : celui des ambitions de l'Europe des prochaines décennies dans un monde encore en pleine croissance démographique..., sauf en Europe.

M.D.

serait dangereux de trop parier sur elle avant longtemps.

Paradoxalement, pour préparer le long terme — à défaut de pouvoir largement compter sur le nucléaire à côté du solaire (sous plusieurs formes) —, la diversité des sources, elle-même variable en fonction des évolutions des prix, semble être la voie inévitable.

Comme les besoins ne cesseront pas de croître, le prix des énergies est appelé à croître lui aussi dans la durée. Certes, on cherchera à faire des économies d'énergie, mais les économies elles-mêmes coûteront cher en investissements, contrôles et entretien.

L'adaptation des acteurs économiques ne se fera donc pas sans à-

coups ni sans intervention des pouvoirs publics. À la limite, les budgets consacrés aux ressources énergétiques prendront peut-être place dans les budgets dits de défense nationale,

tandis que les risques climatiques (émissions de CO₂ et autres gaz à effet de serre) et les pollutions deviendront un thème majeur des relations internationales. ■

Devenez membre de l'association

futuribles

INTERNATIONAL

Association créée en 1960, Futuribles International mène des activités de veille et de prospective comme aide à la décision et à la construction de futurs choisis. Ses objectifs sont de :

☛ **DÉCRYPTER LA DYNAMIQUE À MOYEN ET LONG TERMES DU MONDE CONTEMPORAIN**

Contribuer à une meilleure compréhension de la dynamique du monde contemporain à moyen et à long terme, notamment grâce à un système de veille mutualisée sur l'évolution de l'environnement stratégique des entreprises et des organisations : le système Vigie. Il permet d'être en permanence informé des tendances lourdes (de leur confirmation et / ou inflexion) et émergentes (« signaux faibles ») de cet environnement stratégique.

☛ **EXPLORER LE SPECTRE DES FUTURS POSSIBLES**

Explorer ce qui peut advenir, les futurs possibles (futur-ibles), en tenant compte des grands facteurs de permanence et de discontinuité, pour mettre en évidence les véritables défis du futur.

☛ **EXAMINER, FACE AUX GRANDS DÉFIS, QUELLES POLITIQUES ET STRATÉGIES POURRAIENT ÊTRE ADOPTÉES**

☛ **PROMOUVOIR LA VEILLE ET LA PROSPECTIVE COMME INSTRUMENTS D'AIDE À LA DÉCISION ET À LA STRATÉGIE**

Pour plus d'informations

- ☛ consulter le site Internet www.futuribles.com/membres.html
- ☛ ou contacter Corinne Roëls à Futuribles International, 47 rue de Babylone, F-75007 Paris - Tél. + 33 (0)1 53 63 37 71 Fax + 33 (0)1 42 22 65 54 - E-mail croels@futuribles.com

L'Europe et ses objectifs énergétiques

PAR JEAN-FRANÇOIS DREVET ¹

Collant avec la thématique centrale de ce numéro d'été, Jean-François Drevet présente, dans cette tribune, les grands objectifs de l'Union européenne dans le domaine de l'énergie. Après avoir rappelé qu'il n'y a pas à proprement parler de politique énergétique commune en Europe, l'auteur expose les quatre grands défis auxquels l'Union est confrontée en ce domaine : les économies d'énergie, la production d'énergie renouvelable (avec l'objectif affiché de couvrir 20 % de la consommation finale d'énergie à partir de sources renouvelables d'ici 2020), la baisse des émissions de gaz à effet de serre (dont les objectifs affichés sont particulièrement ambitieux) et enfin les problèmes de sécurité énergétique (en particulier la question de l'approvisionnement en énergie des pays les plus dépendants de l'extérieur). Et dans tous ces domaines, à nouveau, c'est la force d'une communauté unie qui peut faire la différence, autre défi de taille compte tenu de la méfiance croissante des consommateurs qui tendent à imputer à la libéralisation des marchés opérées ces dernières années, sous l'égide de l'Union, les hausses récentes des prix de l'énergie. S.D. ■

Bien que la construction européenne ait commencé avec le charbon (et l'acier) dès 1950 et que le traité Euratom ait été signé en 1957, en même temps que celui de Rome, il n'existe pas encore de politique commune de l'énergie de plein exercice dans l'Union européenne (UE). À partir des dispositions établies dans

le cadre du marché intérieur, la Commission européenne a développé des actions communes, en liaison avec les objectifs environnementaux (lutte contre le changement climatique) et la politique des réseaux transeuropéens (appui à la construction de nouvelles infrastructures). Elle a fait prendre par les États membres une

1. Ancien fonctionnaire à la Commission européenne. Les propos exprimés ici n'engagent que leur auteur.

série d'engagements, en principe obligatoires mais qui tardent à se concrétiser.

Par ailleurs, quels que soient les besoins, il ne semble pas que le contexte soit bien favorable à l'émergence d'une nouvelle politique commune. Il n'y a pas qu'avec les accords de Schengen (même le très sérieux Danemark rétablit les contrôles à ses frontières) que les États membres prennent actuellement des libertés. Dans sa tentative d'amélioration de la sécurité dans les centrales nucléaires, la Commission ne parvient pas à les convaincre de renforcer les normes communes. Les divergences profondes qui s'affirment, parfois en fonction d'intérêts commerciaux, ne laissent pas espérer une protection accrue, alors que le problème dépasse largement les frontières et concerne à peu près tout le monde.

Une démarche ambitieuse a pourtant été engagée. Dans sa communication de novembre 2010², la Commission européenne rappelle les objectifs établis en janvier 2008 : réduire de 20 % la consommation d'énergie primaire, élever la part des énergies renouvelables à 20 % de la consommation finale d'énergie et diminuer de 20 % la production de gaz à effet de serre par rapport à 1990.

À ces objectifs connus sous le nom de « paquet 20-20-20 » s'ajoute celui de l'accroissement de la sécurité énergétique de l'UE, par une réduction des importations (qui représentent actuellement plus de 50 % de la consommation finale).

En formulant cette politique et en la faisant adopter par le Conseil, la Commission a voulu donner à l'UE un rôle de *leader*. Mais les résultats pourraient ne pas être à la hauteur des espérances. Non seulement la communication de la Commission reconnaît que ces objectifs seront difficiles à atteindre, mais une étude récente³ signale qu'ils sont porteurs de contradictions qui pourraient générer des difficultés supplémentaires. Par ailleurs, les dégâts subis à la centrale nucléaire japonaise de Fukushima pourraient conduire à des révisions déchirantes dans la composition du *mix* énergétique qui avait servi de base à la fixation des objectifs.

Les économies d'énergie

Bien que l'on ne soit qu'en 2011, les experts sont assez pessimistes quant à la capacité de réaliser les économies d'énergie prévues : on ne serait actuellement qu'à 9 % et la courbe n'est pas favorable. D'après les informations fournies par les États membres, on table sur une baisse d'environ 14 % à l'horizon 2020, soit une réalisation à 70 % de l'objectif. Faute de mesures suffisamment incitatives, les économies attendues sur les bâtiments ne se concrétisent pas.

La Commission veut développer les aides à l'investissement, la prise en compte des économies d'énergie dans la passation des marchés publics et doit y consacrer une partie des dotations structurelles consacrées à la modernisation de l'habitat. Dans les transports, les alternatives à la

2. *Énergie 2020. Stratégie pour une énergie compétitive, durable et sûre*. Bruxelles : Commission européenne, COM(2010) 639 final, 10 novembre 2010.

3. BÖHRINGER Christoph et KELLER Andreas. *Energy Security: An Impact Assessment of the EU Climate and Energy Package*. Frederiksberg : Copenhagen Consensus Center, mai 2011.

Évolution de la part des énergies renouvelables dans la production énergétique de l'UE (en % de la consommation finale d'énergie)

	2001	Résultat le plus récent	Objectif 2010 (indicatif)	Objectif 2020 (obligatoire)
Électricité	13,4	16,1 (2007)	21	Pas d'objectif
Transport routier	0,3	3,4 (2008)	5,75	10
Divers dont chauffage	9,1	11,5 (2007)	Pas d'objectif	Pas d'objectif
Consommation finale	7,6	9,8 (2007)	Pas d'objectif	20

Source : COMMISSION EUROPÉENNE. *Énergie 2020. Op. cit.*

route et à l'avion ne parviennent pas à augmenter leurs parts. En cas de retour de la croissance économique, la consommation d'énergie va reprendre et pourrait compenser les économies réalisées pendant la période de crise. Enfin, s'il est clair que l'économie européenne consomme moins d'énergie que les autres par unité de PIB (produit intérieur brut), le recul de son industrie et les délocalisations y sont pour quelque chose : du point de vue de l'avenir global de la planète, le déplacement des surconsommations d'énergie n'apporte pas d'amélioration réelle.

La production d'énergie renouvelable

La production d'énergie renouvelable connaît incontestablement des progrès importants : depuis 2001, elle a crû en moyenne de 6,1 % par an, grâce au développement de l'énergie éolienne qui représentait, en 2007, 25 % de la capacité installée. Cependant, confirmant les résultats du rapport d'étape publié en avril 2009⁴, la Commission constate que les objectifs fixés pour 2010 n'ont pas été atteints. Si on veut respecter ceux de 2020, il faut faire des efforts importants sur la décennie en cours. En se

basant sur le rythme de croissance observé depuis 2001, c'est néanmoins faisable.

Par secteur, le tableau ci-dessus montre des performances inégales. Dans la production d'électricité, des progrès au rythme actuel ne seront pas suffisants. Avec un point de départ très modeste, le transport routier a fait des efforts importants. Le problème est de savoir s'il sera en mesure d'atteindre le niveau de 10 %, qui a été acté par les ministres responsables. Par État membre, les résultats sont très disparates, la majorité d'entre eux étant bien au-dessous de leurs objectifs.

Là aussi, la Commission souligne la nécessité d'incitations importantes, le coût des énergies renouvelables étant en général plus élevé que celui des énergies classiques. Elle espère que les progrès technologiques faciliteront l'évolution vers un recours de plus en plus important à ces énergies.

La réduction des émissions de gaz à effet de serre

Dans le domaine des émissions de gaz à effet de serre, l'UE a pris des positions plus ambitieuses : non seulement la diminution de 20 % en

4. *Rapport sur les progrès des énergies renouvelables*. Bruxelles : Commission européenne, COM(2009) 192 final, 24 avril 2009.

2020 indiquée plus haut, mais une réduction supplémentaire des émissions de CO₂ de 80 % à 95 % d'ici à 2050, « pour autant que d'autres pays développés s'engagent à atteindre des réductions comparables et que les pays en développement plus avancés sur le plan économique apportent une contribution adaptée à leurs responsabilités et à leurs capacités respectives ⁵. » Comme l'Europe n'a pas été très suivie dans ce domaine, les interrogations se multiplient sur l'opportunité de maintenir de tels engagements, nécessaires du point de vue de l'avenir de la planète, mais qui ne peuvent aboutir isolément.

La Commission reconnaît sans ambages « qu'il est improbable que la stratégie existante permette d'atteindre tous les objectifs fixés pour 2020 et elle apparaît totalement inadéquate par rapport aux défis à plus long terme ». En conséquence, elle propose une nouvelle stratégie avec des moyens de contrôle plus importants : puisque les États membres se sont mis d'accord sur des objectifs juridiquement contraignants, ils doivent se donner les moyens de les atteindre. Pour sa part, la Commission est en train de réformer le système des quotas d'émission qui a récemment donné lieu à des fraudes ⁶.

La sécurité énergétique

Dans les années 1960, avec le déclin du charbon, l'Europe est devenue

importatrice nette d'énergie. L'épuisement progressif des gisements d'hydrocarbures en mer du Nord est de nature à accentuer cette dépendance, qui touche aussi fortement les nouveaux États membres, qui importent une grande partie de leur pétrole, de leur gaz et même de leur électricité de Russie. En Europe occidentale, où les approvisionnements sont plus diversifiés, la dépendance globale n'est pas moindre.

Des événements récents, notamment le « chantage au gaz » développé par Gazprom et l'instabilité chronique du Moyen-Orient, ont incité la Commission à ajouter la sécurité d'approvisionnement à ses objectifs : « la diversification des combustibles, des sources d'approvisionnement et des itinéraires de transit est essentielle pour assurer la sécurité de l'UE... En 2011, la Commission présentera des propositions concrètes destinées à renforcer la cohérence globale et l'efficacité de notre politique extérieure dans le domaine de l'énergie... ⁷ » Il s'agit notamment d'obtenir des fournisseurs de l'UE une harmonisation de leurs pratiques commerciales sur le modèle UE (dans le cadre de la politique de voisinage qui leur ouvre le marché intérieur européen), de promouvoir des normes juridiquement contraignantes (sécurité et non-prolifération nucléaire) et d'aider à la construction d'infrastructures alternatives pour ne pas dépendre d'un seul

5. D'après les conclusions du Conseil européen des 29-30 octobre 2009.

6. « La Commission a recensé une série de mesures que les États membres peuvent d'ores et déjà mettre en place à court terme pour renforcer la sécurité, notamment une révision régulière des plans de sécurité, un renforcement des politiques applicables aux comptes de registres et aux contrôles d'identité, la formation des utilisateurs des registres, etc. À moyen et long termes, nous redoublons d'efforts pour trouver des solutions en coopération avec les États membres, d'une part, et avec les parties prenantes dans le cadre d'un dialogue régulier, d'autre part » a déclaré à ce propos Connie Hedegaard, membre de la Commission en charge de l'action pour le climat, le 23 février 2011.

7. Communication *Énergie 2020*. *Op. cit.*

fournisseur. Cette politique de *soft power*, lancée avec la Charte de l'énergie, dépend beaucoup de la bonne volonté des partenaires de l'UE, qui reste à démontrer, comme le montre le comportement de la Russie, qui tient beaucoup au monopole d'exportation de Gazprom.

Sur le fond, l'UE va être confrontée aux divergences existant entre ses objectifs. Comme l'indique l'étude de l'université d'Oldenburg⁸, la sécurité énergétique n'est pas un concept clairement établi : elle entre en contradiction avec la recherche du meilleur prix, qui est un point fondamental de la libéralisation des marchés que la Commission promeut par ailleurs. Elle peut également contrarier les efforts de lutte contre le changement climatique. D'après l'étude, qui se base sur les résultats d'une modélisation approfondie, la priorité à la sécurité énergétique s'ajoutera à d'autres facteurs pour entraîner une hausse du coût de l'énergie. Au contraire, la priorité à la lutte contre le changement climatique augmentera les importations, donc réduira la sécurité énergétique⁹.

Parmi les autres efforts de diversification, le projet « Nabucco » de gazoduc contournant la Russie, qui devrait assurer l'acheminement vers l'Europe de 31 milliards de mètres cubes par an de gaz de la Caspienne (Azerbaïdjan et Turkménistan), se heurte à des

difficultés techniques et financières, ainsi qu'à des concurrences politiques. Son coût augmente constamment et les investisseurs s'interrogent.

Une politique crédible ?

Dans un contexte défavorable à la construction européenne dans son ensemble, la mise en place d'une politique fortement structurée reste nécessaire, non seulement par extension du marché intérieur, mais encore davantage pour permettre à l'UE de s'affirmer face à ses fournisseurs et aux importateurs des pays émergents de plus en plus gourmands en énergie.

Pour cela, il faudra convaincre une opinion échaudée par les promesses non tenues de réduction des coûts : les consommateurs sont maintenant confrontés à la perspective de fortes hausses, qu'ils ont tendance à attribuer à la libéralisation des marchés opérée à l'initiative de l'Europe.

Enfin, la fixation d'objectifs ambitieux, peut-être inaccessibles et probablement divergents, sinon contradictoires, incite à la prudence : la sédimentation d'ambitions sans évaluation de leurs conséquences est une opération à courte vue qui peut se retourner contre ses auteurs. La définition d'objectifs à long terme ne peut aller sans une démarche prospective qui éclaire les choix. ■

8. BÖHRINGER Christoph et KELLER Andreas. *Op. cit.*

9. « Le paquet climat-énergie porterait les importations d'énergie à 52,4 % de la consommation totale de l'UE en 2020, contre 50 % en 2004. »

FUTURIBLES INTERNATIONAL - 20 SEPTEMBRE 2011

**INTRODUCTION À LA VEILLE ET À LA DÉMARCHE PROSPECTIVE
CONCEPTS, MÉTHODES ET APPLICATIONS PRATIQUES**

INTERVENANT

Hugues de Jovenel, directeur général du groupe Futuribles

OBJECTIFS

- Montrer l'utilité de la veille et de la démarche prospective comme instruments d'anticipation au service de la décision et de l'action. Préciser les concepts en usage, les philosophies qui les sous-tendent, leurs vertus et leurs limites.
- Rendre compte des méthodes et des outils de veille, d'intelligence stratégique et de prospective, et fournir aux participants une description précise et concrète de la manière d'organiser ce processus de veille et de réflexion prospective, au travers de la théorie et de la pratique (exemples d'application).
- Permettre aux participants de s'approprier, en une journée, les concepts et les méthodes de veille, de prospective exploratoire et d'analyse stratégique.

PROGRAMME

- **Introduction à la veille et à la démarche prospective comme instruments d'exploration et de construction du futur :** l'avenir comme territoire à explorer (veille et exploration des futurs possibles) ; et comme territoire à construire (le pouvoir, la vision, le projet et la stratégie)
- **La veille prospective : pour quoi faire ? comment faire ? Discerner les racines des futurs possibles :** distinguer l'essentiel de l'accessoire ; le problème des indicateurs, des données, de leur interprétation... et de nos erreurs d'appréciation ; et celui de nos bévues, de notre refus de voir, et de penser l'avenir autrement...
- **Les étapes d'une démarche prospective appliquée à l'élaboration d'un projet, d'une stratégie :** périmètre et horizon temporel de la réflexion ; représentation du système (facteurs et acteurs déterminants) ; rétrospective analytique et hypothèses contrastées d'évolution ; construction des scénarios exploratoires et enjeux clefs ; stratégies alternatives possibles
- **Études de cas, exemples d'application et enseignements pour passer à l'action**

PRIX

Les frais de participation sont de 800 euros HT, soit 956,80 euros TTC*, payables lors de l'inscription à Futuribles International (déclaré organisme de formation). Ils comprennent la participation à l'ensemble de la formation, le déjeuner et le dossier de base remis aux participants.

RENSEIGNEMENTS COMPLÉMENTAIRES

Programme détaillé consultable sur le site Internet www.futuribles.com/formation.html ou envoyé sur demande auprès de Corinne Roëls, Futuribles International, 47, rue de Babylone - 75007 Paris - France • Tél. : 33 (0)1 53 63 37 71 Fax : 33 (0) 1 42 22 65 54 • E-mail : croels@futuribles.com

*Remise de 10 % en cas d'inscription multiple dès la deuxième participation, dispense de frais pour les membres partenaires de Futuribles International et remise de 50 % pour les membres associés (valable pour une personne par formation).

IDÉES & FAITS PORTEURS D'AVENIR

La population mondiale en 2100

Tous les deux ans, la Division des Nations unies pour la population renouvelle ses estimations et projections de population mondiale. En 2011, les projections à l'horizon 2050 ont été complétées par des projections à l'horizon 2100 : un exercice délicat qui a déjà suscité certaines critiques.

Selon la variante centrale, la planète pourrait ainsi compter 10,1 milliards d'habitants en 2100, contre 7 milliards aujourd'hui et 9,3 milliards en 2050.

Sans surprise, l'essentiel de cette croissance démographique proviendrait des actuels pays en développement ou peu développés, dont 39 en Afrique, neuf en Asie, six en Océanie et quatre en Amérique latine.

L'intérêt de ces nouvelles projections tient essentiellement aux hypothèses faites concernant l'évolution de l'indice conjoncturel de fécondité (ICF)¹ dans le monde. Dans leurs précédentes projections, réalisées en 2008, les Nations unies envisageaient que l'ICF moyen continuerait à dimi-

nuer et atteindrait 1,85 enfant par femme, dans le monde, en 2050. La variante centrale des projections de 2011 maintient cette hypothèse mais considère qu'à l'horizon 2100, le taux de fécondité des femmes des pays riches, des pays en développement et des pays pauvres se rapprochera progressivement de 2,1 enfants par femme, seuil assurant aujourd'hui le remplacement des générations dans les pays les plus développés.

Cette hypothèse des Nations unies d'un relèvement de la fécondité dans les pays développés et d'une baisse simultanée dans les pays en développement a suscité le scepticisme des démographes.

Actuellement, presque 20 % de la population mondiale vivent dans un pays où la fécondité est proche de cinq enfants par femme et tend à diminuer ; 40 % connaissent une fécondité de 2,6 enfants par femme (en baisse également), et 42 % une fécondité de 1,6 enfant par femme (en légère hausse depuis quelques années). L'hypothèse des Nations unies suppose de très importantes évolutions dans les comportements de fécondité de la population mondiale.

Selon ce scénario, la population cumulée des pays à faible taux de fécondité atteindrait un maximum de 3,1 milliards d'habitants en 2030 et diminuerait par la suite (elle atteindrait 1,4 milliard d'habitants en Chine et 740 millions en Europe). Dans les

1. L'indice conjoncturel de fécondité, ou somme des naissances réduites, mesure le nombre d'enfants qu'aurait une femme au cours de sa vie, si les taux de fécondité observés l'année considérée à chaque âge demeuraient inchangés.

pays où la fécondité est moyenne, la croissance démographique se poursuivrait jusqu'en 2060, date à laquelle ils compteraient 3,8 milliards d'habitants (1,7 milliard en Inde, qui dépasserait donc la Chine). Enfin, les pays où la fécondité est aujourd'hui élevée verraient leur population tripler d'ici 2100, passant de 1,2 milliard d'habitants à 4,2 milliards. Ainsi, le Nigeria, qui est actuellement le septième pays le plus peuplé au monde, avec 158 millions d'habitants, pourrait passer au troisième rang mondial d'ici 2100, avec 730 millions d'habitants (soit autant que l'Europe à la même date).

À titre de comparaison, dans la variante haute des projections, dans laquelle la fécondité mondiale est de 2,6 enfants par femme en 2100, la population mondiale atteindrait 10,6 milliards d'habitants en 2050 et 15,8 milliards en 2100. Par contre, dans la variante basse, le taux de fécondité n'est plus que de 1,6 enfant par femme en 2100, ce qui se traduit par une baisse de la population mondiale à partir de 2050 : de 8,1 milliards d'habitants, elle passe à 6,2 milliards en 2100. Autrement dit, selon la variante considérée, la population mondiale varie de deux milliards d'habitants en 2050..., et de presque 10 milliards en 2100 !

De quoi relancer les débats sur les capacités de la planète à supporter et nourrir 8, 10 ou 16 milliards d'habitants à l'horizon 2100...

Cécile Désaunay

Sources : *World Population Prospects: The 2010 Revision*. New York : Division des Nations unies pour la population, 2011 ; « World Population to Reach 10 Billion by 2100 if Fertility in all Countries Converges to Replacement Level ». Communiqué de presse des Nations unies, 3 mai 2011 ; PEARCE Fred. « Dubious Assumptions Prime Population Bomb ». *Nature*, vol. 473, n° 125, 12 mai 2011.

États-Unis : les enjeux de la légalisation de la drogue

La dette publique des États-Unis représente aujourd'hui 60 % du PIB (produit intérieur brut), et elle pourrait atteindre 75 % à l'horizon 2020¹. Afin de réduire les dépenses de l'État sans diminuer le niveau de vie des Américains, des chercheurs du Cato Institute² proposent une légalisation de toutes les drogues sur le territoire américain, ce qui permettrait d'augmenter les recettes du gouvernement de 88 milliards de dollars US par an.

La légalisation permettrait de supprimer les arrestations liées au trafic ou à la possession de drogue, qui représentent environ 13 % des arrestations policières. Elle permettrait également de diminuer les dépenses liées à la justice et aux incarcérations : les jugements pour violation des lois antidrogues représentent 34 % des dépenses judiciaires, et une peine de prison sur cinq concerne le trafic, la consommation ou la possession de drogue.

Ces dépenses, prises en charge par les gouvernements locaux, s'élèvent à 26,1 milliards de dollars US par an, alors que la somme recueillie grâce aux saisies et aux amendes représente moins de 400 millions de dollars US par an.

Les dépenses nettes de l'État fédéral pour la lutte contre la drogue à l'échelle nationale et internationale s'élèvent à 15,6 milliards de dollars

1. CBO (Congressional Budget Office). *The Budget and Economic Outlook: Fiscal Years 2010 to 2020*. Washington, D.C. : CBO, 2010.

2. MIRON Jeffrey A. et WALDOCK Katherine. *The Budgetary Impact of Ending Drug Prohibition*. Washington, D.C. : Cato Institute, 2010.

US en 2010, soit environ 500 dollars US par seconde ³.

La légalisation de la drogue permettrait au gouvernement américain d'économiser 41,3 milliards de dollars US : 20 milliards de dollars US proviendraient de la légalisation de la cocaïne et de l'héroïne, 8,7 milliards de la légalisation du cannabis et 12,6 milliards de la légalisation des autres drogues. La consommation de marijuana serait beaucoup plus élevée (14,4 millions de consommateurs en 2007) que la consommation de cocaïne et d'héroïne (2,3 millions en 2007) ⁴, mais l'absorption, la possession et le trafic de substances opiacées sont plus sévèrement punis et coûtent donc plus cher à l'État.

La légalisation de la drogue aux États-Unis rendrait possible sa vente sur le territoire américain : taxée au même titre que l'alcool ou les cigarettes, la vente annuelle de drogue rapporterait alors 46,7 milliards de dollars US de recettes par an au gouvernement ⁵.

Les opposants à la légalisation craignent qu'elle n'incite à la consommation. Toutefois, selon les experts, la baisse du prix de la drogue due à la suppression du « coût du risque » serait compensée par la création de taxes, et le prix au détail ne varierait pas beaucoup. Par ailleurs, la légalisation de la drogue pourrait entraîner sa désacralisation pour certains

consommateurs (notamment les adolescents), qui l'utilisent comme outil de contestation. Enfin, la légalisation permettrait aux consommateurs dépendants de sortir de la criminalité et de se faire soigner plus facilement.

Le cas du Portugal est un exemple significatif ⁶ : en 2001, le gouvernement a dépénalisé la consommation, l'achat et la possession de toutes les drogues. Ces actes sont toujours illégaux (ils peuvent faire l'objet d'amendes), mais ils ne sont plus criminels. Depuis la dépénalisation, la consommation de drogue a globalement diminué. Il y a moins de nouveaux consommateurs chez les 13-18 ans (considérés comme une population à risque) : en 2006, 10,1 % des 13-15 ans avaient déjà consommé de la drogue une fois dans leur vie, contre 14,1 % en 2001 ; pour les 16-18 ans, ces chiffres sont respectivement de 21,6 % en 2006 et 27,6 % en 2001. La consommation de marijuana a légèrement augmenté chez les 19-24 ans, mais la consommation d'héroïne (considérée comme la drogue la plus socialement destructrice) a diminué pour toutes les classes d'âge. Par ailleurs, la dépénalisation a permis la réduction des incidents liés à la drogue (accidents de voiture, violence...) : en 1999, 400 incidents plus ou moins graves liés à la consommation de drogue ont été enregistrés dans le pays, contre 290 en 2006.

La simple dépénalisation ne permettrait pas aux États-Unis de prélever des taxes (la vente demeurant interdite) et ne supprimerait pas les dépenses en matière de lutte contre le trafic de drogues, mais elle per-

3. Selon le site Internet www.drugsense.org/cms/wodclock.

4. DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES. *Results from the 2007 National Survey on Drug Use and Health: National Findings*. Rockville : Substance Abuse and Mental Health Services Administration (SAMHSA) / Office of Applied Studies (OAS), septembre 2008.

5. MIRON Jeffrey A. et WALDOCK Katherine. *Op. cit.*

6. GREENWALD Glen. *Drug Decriminalization in Portugal: Lessons for Creating Fair and Successful Drug Policies*. Washington, D.C. : Cato Institute, 2009.

mettrait la suppression des dépenses liées à la consommation, qui occupent une part importante du budget : 80 % des arrestations liées à la drogue ont pour motif la consommation.

Laurie Grzesiak,
brève issue du système Vigie

Le réservoir de main-d'œuvre chinois se tarit

Selon le recensement de 2010, la Chine compte 1,34 milliard d'habitants. Un résultat attendu. La surprise est venue de l'évolution de la pyramide des âges. Non pas de son sommet, car la longévité évolue lentement, mais de sa base. Le nombre des moins de 15 ans diminue plus vite qu'anticipé : sur la base du recensement de 2000, les Nations unies prévoyaient une baisse de 57 millions, elle a été de 93 millions. Cela s'explique par la baisse de l'indice conjoncturel de fécondité qui, surestimé par les statistiques officielles, est de

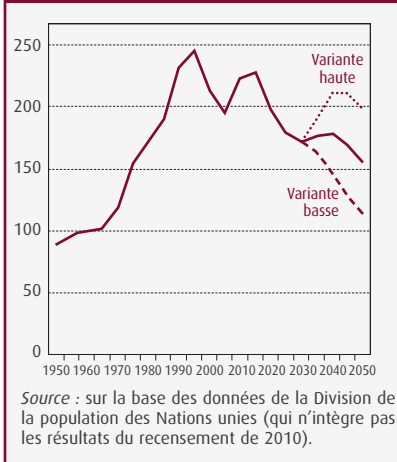
1,4 enfant par femme, moins qu'en France ou aux États-Unis et plus qu'en Corée du Sud (1,2). Conséquence de cet effondrement, entre 1990 et 2008, près de la moitié des écoles primaires chinoises a fermé.

Le nombre de personnes en âge de travailler avait progressé de 2,5 % par an dans les années 1970 et 1980, de 1 % par an dans les années 1990. Leur nombre a augmenté de 150 millions entre 2000 et 2010, aussi le *ratio* entre ces actifs potentiels et la population atteint 70 %, ce qui donne un avantage à la Chine sur l'Inde (64 %) et les États-Unis (66 %). Cet avantage est en train de disparaître. Commencée à la fin de la décennie 1970, la transition démographique chinoise, parmi les plus rapides au monde, s'achève.

Le recensement suggère que le nombre d'actifs potentiels a commencé à diminuer. Parmi ces derniers, la cohorte des 20-29 ans occupe une place déterminante, elle est en effet le vivier dans lequel les entreprises puisent tout à la fois les bras et les doigts de l'« atelier du monde ». Conséquence du *boom* de la natalité de la période maoïste, le gonflement de cette cohorte entre 1980 et 1995 (+ 100 millions) a contribué à l'envolée de l'économie chinoise. Commencée en 1995, sa contraction s'accélère : elle est sans doute plus marquée dans les villes que dans les campagnes où la politique de l'enfant unique n'a pas été appliquée de façon aussi rigoureuse.

Le recensement relance le débat sur le réservoir de main-d'œuvre naguère considéré comme illimité. On en aperçoit le fond sans qu'il ne soit encore tari. Par ailleurs, le gouvernement dispose d'outils pour agir sur les deux extrémités de la pyramide :

La cohorte des 20-29 ans en Chine (en millions d'habitants)



LES SALAIRES CHINOIS EN HAUSSE

Les salaires augmentent en Chine. C'est notamment le cas dans le groupe Foxconn, qui assemble l'iPhone et l'iPad d'Apple. À la suite de suicides survenus dans ses usines de Shenzhen et des grèves qu'ils avaient provoquées, les salaires ont pratiquement doublé. Ils paraissent encore très faibles vus d'Europe (l'équivalent de 220 euros par mois), mais comme le cours du yuan se raffermi, une partie des sous-traitants à la recherche de faibles coûts salariaux change de région. L'Inde en attire de plus en plus. En Chine même, des activités se déplacent de la côte vers l'intérieur où « l'armée de salariés potentiels » reste très abondante.

Ainsi se poursuit un mouvement que l'on a souvent vérifié dans l'histoire : les basses rémunérations attirent des activités, mais au bout d'un délai variable, elles finissent par s'améliorer, ce qui pousse à une évolution des productions vers le haut dans la région concernée et au déplacement d'activités plus rustiques vers de nouveaux territoires. On l'observera en Chine et en Asie — notamment — pendant encore quelques décennies. Le *dumping* social semble bien être une étape du développement.

Michel Drancourt

— En haut, en allongeant l'âge de la retraite comme l'ont fait les Japonais. Une mesure qui ne devrait pas faire plus de vagues en Chine qu'elle n'en a fait au Japon et ce d'autant plus que de nombreux *seniors* continuent de travailler faute de retraite. Cette mesure ne répond pas à la demande des entreprises d'assemblage du delta de la rivière des Perles.

— En bas : les effets d'un relâchement de la politique de l'enfant unique ne seront pas perceptibles avant 2030 (et ils sont à la base de la variante haute du graphique), mais entre-temps, le gouvernement peut libéraliser le *hukou*. Cette réglementation qui date de la dynastie Han a été adoptée par la Chine communiste. Depuis les années 1980, en limitant l'accès aux services publics urbains (santé, éducation) aux seuls résidents, ce certificat freine les migrations. Les migrants (240 millions) qui travaillent en ville sont *de facto* des citoyens de seconde zone. La réforme du *hukou*

est un serpent de mer de la vie politique chinoise : la veille du Congrès national du peuple de 2010, plusieurs journaux avaient plaidé pour son démantèlement et des villes l'ont supprimé pour les résidents de la province.

Une éventuelle réforme du *hukou* donnerait quelques années de répit aux industriels qui, inexorablement, devront s'habituer à une main-d'œuvre plus rare et plus chère. La fin de la transition démographique contribuera tout à la fois à la baisse du rythme de développement de la Chine et au changement de son régime de croissance économique, qui devrait reposer davantage sur la consommation.

Jean-Raphaël Chaponnière,
Asie 21

Source : ce texte a été initialement publié dans la *Lettre Asie 21-Futuribles* (lettre confidentielle de veille et de prospective sur l'Asie), n° 40, mai 2011.

Les brevets de gènes marins : un monopole ?

La biodiversité des espèces marines est de loin bien plus riche que celle des milieux vivant sur la terre ferme, et les progrès constants des techniques biologiques, en particulier celles du séquençage des génomes, ont stimulé la croissance du nombre des dépôts de brevets associés à des gènes d'organismes marins. Ce sont évidemment les perspectives d'application des biotechnologies marines (notamment la mise au point de médicaments tels que des anticancéreux) qui expliquent cette floraison de brevets.

Dans un article récent, trois chercheurs d'instituts français, espagnol et australien¹ ont mis en évidence, à partir des données d'une banque de gènes, cette forte croissance des dépôts portant sur des brevets d'espèces marines (elle a été en moyenne de 12 % par an sur la période 1991-2009) ; il est vrai que ceux-ci ne représentent que 2 % des brevets sur des gènes d'espèces animales et végétales. Ils ont aussi constaté que si ces brevets ont été déposés par des instituts et des entreprises de 31 pays, 10 pays détiennent un monopole de fait sur les brevets. On trouve ainsi en tête les États-Unis, suivis par l'Allemagne et le Japon (à eux trois, ils déposent 70 % des brevets). La France est en quatrième position avec 5 % des dépôts (partagés à égalité entre les laboratoires publics et les entreprises) et la Suisse, qui est depour-

vue de façade maritime, se trouve en neuvième position.

On constate que ces dépôts se sont accélérés récemment (sur la période considérée, 95 % des dépôts ont été effectués après l'an 2000), ce qui traduit sans doute une stratégie industrielle misant sur les potentialités des molécules d'origine marine (un marché de l'ordre d'un milliard de dollars US pour des anticancéreux en 2005). L'exploitation d'enzymes thermostables synthétisées par des organismes marins, utilisables dans l'agro-alimentaire et les biocarburants, est aussi une autre piste intéressante.

Les chercheurs ont remarqué dans leur enquête que la très grande majorité des brevets n'indique pas l'origine géographique des espèces auxquelles appartiennent les gènes brevetés. De fait, il existe un quasi-vide juridique pour l'exploitation des ressources génétiques marines. Si la Convention des Nations unies sur le droit de la mer (dite de Montego Bay), signée en 1982, a reconnu que les ressources des océans situées hors des zones économiques exclusives (ZEE) étaient un « patrimoine commun de l'humanité », les clauses prévoyant leur exploitation, confiée à une Autorité internationale des fonds marins (son siège est à la Jamaïque), s'appliquent pour l'heure aux ressources minérales et non aux ressources génétiques (des dispositions particulières ont été prises pour la pêche). Quant à la Convention sur la diversité biologique (un traité international), si elle prévoit bien une protection des ressources génétiques, ainsi que leur exploitation équitable à travers un protocole adopté lors d'une conférence à Nagoya en 2010, force est de constater que l'on n'est pas encore parvenu à un accord pour son application aux espèces marines

1. ARNAUD-HAOND Sophie, ARRIETA Jesús M., DUARTE Carlos M. « Marine Biodiversity and Gene Patents ». *Science*, vol. 331, n° 6024, 25 mars 2011, pp. 1521-1522.

dans la zone internationale des fonds marins.

L'intérêt industriel potentiel des ressources génétiques marines explique certainement la persistance de ce vide juridique, ainsi que la réticence des pays intéressés par les brevets couvrant leur exploitation à confier leur gestion à une autorité internationale. Les États-Unis, *leaders* des déposants de brevets, n'ont d'ailleurs toujours pas ratifié la Convention des Nations unies sur le droit de la mer...

Pierre Papon

Ralentir, la nouvelle urgence

Selon le sociologue allemand Hartmut Rosa, l'accélération permanente des temps constituerait une caractéristique majeure des sociétés modernes¹. Alors que la vie quotidienne est de plus en plus dictée par la vitesse, la lenteur serait cependant en train de (re)devenir une valeur rare et précieuse par les individus.

Ainsi, l'édition 2011 de la Foire de Paris, qui s'est tenue en mai dernier, a été consacrée au *slow time* : plus de 600 000 visiteurs ont flâné dans les allées pour tenter de « retrouver leur tortue intérieure² ».

Selon une récente étude de l'institut Ipsos, de plus en plus d'indivi-

us en France et en Europe chercheraient à ralentir leur rythme de vie. La moitié des Français ont l'impression de faire les choses plus vite qu'il y a cinq ans. Presque 60 % ont le sentiment qu'ils sont « toujours pressés » et qu'ils n'ont jamais le temps de faire ce qu'ils veulent, soit six points de plus qu'en 2009. Presque 9 personnes sur 10 se disent persuadées que le monde continuera à aller de plus en plus vite à l'avenir. Pourtant, 8 Français sur 10 (tous âges confondus) disent aimer prendre leur temps pour faire les choses, et 6 sur 10 aimeraient ralentir leur rythme de vie.

Face à l'accélération et à l'hyper-sollicitation permanentes des médias, des technologies et de la sphère économique, les individus chercheraient, selon Ipsos, à se ménager des espaces de lenteur. La vitesse (des déplacements, de la consommation...) étant souvent associée à la surexploitation des ressources naturelles, il s'agirait aussi de retrouver un rythme plus en accord avec l'environnement.

La volonté de ralentir le rythme de vie s'est manifestée dès les années 1990 avec le *slow food*, concept imaginé par un critique gastronomique italien, Carlo Petrini, en réponse au *fast food* et pour revaloriser le temps de préparation des aliments et leur dégustation. L'association Slow Food compte aujourd'hui plus de 100 000 membres dans le monde³. Parallèlement, toujours en Italie, sont apparues les premières *slow cities* : le réseau Cittaslow⁴ compte, en 2011, 142 villes dans le monde (dont deux en France).

Depuis, le concept a été décliné dans de nombreux secteurs, notam-

1. Voir à ce sujet l'ouvrage d'Hartmut Rosa, *Accélération. Une critique sociale du temps* (Paris : La Découverte, 2010), analysé par Pierre-Yves Cusset dans *Futuribles*, n° 371, février 2011, pp. 91-93.

2. Selon l'expression reprise par les organisateurs de la Foire à Carl Honoré, journaliste canadien et auteur d'*Éloge de la lenteur. Et si vous ralentissiez* (Paris : Marabout, 2005).

3. Site Internet www.slowfood.com.

4. Site Internet www.cittaslow.net.

ment dans le monde du travail : des entreprises comme Nike, Deloitte et France Télécom⁵ offrent désormais la possibilité à leurs salariés de se reposer, voire de faire la sieste après le déjeuner. Dans certaines grandes villes, des « salons de sieste » et des hôtels proposent également de louer une chambre pour se détendre pendant la journée.

Selon l'étude Ipsos, 40 % des Français déclarent avoir déjà ralenti leur rythme de vie ou avoir l'intention de le faire pour profiter plus de la vie et se sentir moins stressés. La volonté de ralentir le rythme ne concernerait cependant pas toutes les activités : il s'agirait en priorité de profiter plus de sa famille et de ses amis, et de consacrer plus de temps au tourisme et aux loisirs. Pas étonnant, donc, que se développent aussi des offres de tourisme *slow*, proposant par exemple de voyager en train ou en bateau plutôt qu'en avion, voire à vélo ou à pied...

Le mouvement du *slow* traduit en tout cas une évolution étonnante, voire paradoxale : alors que les lenteurs subies au quotidien (retards des transports, embouteillages, lenteur de la connexion Internet...) apparaissent comme de plus en plus intolérables, d'autres types de lenteurs sont au contraire recherchées pour des activités qui (re)deviennent des plaisirs et qui ouvrent la porte à de beaux lents demains...

C.D.,
brève issue du système Vigie

Sources : BARDON Yves. « Ipsos publie l'édition annuelle d'Ipsos Flair, "France 2011 : société d'extralucides" ». Communiqué de presse, 9 mars 2011 ; « Du "slow" et vite ! »

5. Voir « Lyon : France Télécom appelle à la sieste ». *Métro*, 31 janvier 2011.

Ipsos, 24 mai 2011 ; Le « SLOW » ou l'aspiration des Européens à ralentir. Enquête sur une tendance émergente. Paris : Ipsos pour la Foire de Paris, 5 mai 2011 ; et site Internet www.slowmovement.com.

Les 500 de Fortune : la masse et le profit

Comme chaque année depuis 1955, la revue américaine *Fortune* a publié¹ la liste des 500 premières entreprises américaines classées selon leur chiffre d'affaires. Mais on y trouve aussi d'autres critères de classement : par profits, par cours boursiers (au 25 mars 2011) ou par retours sur investissement.

On commentera ici les différences entre le classement par chiffres d'affaires et celui par profits en prenant quelques cas assez frappants. Si l'on observe les 10 premières sociétés classées selon leur chiffre d'affaires, on constate que la première en chiffre d'affaires, le distributeur Wal-Mart Stores, qui est aussi le plus gros employeur américain, n'est que sixième par les profits. Exxon Mobil, deuxième par le chiffre d'affaires, est premier devant AT&T (American Telephone & Telegraph) douzième en chiffre d'affaires, lui-même suivi du pétrolier Chevron et de Microsoft, quatrième par les profits et 38^e par le chiffre d'affaires. Le cinquième par les profits est la banque J.P. Morgan Chase & Co (13^e par le chiffre d'affaires).

IBM est septième par les profits et 18^e par le chiffre d'affaires, Apple est 35^e par le chiffre d'affaires (56^e l'année précédente) et huitième par les profits. Le groupe pharmaceutique

1. Dans son numéro du 25 mai 2011.

Johnson & Johnson est neuvième pour les profits et 40^e par le chiffre. Le 10^e par les profits est une société d'assurance, Berkshire Hathaway, septième par le chiffre d'affaires.

Si on compare les chiffres d'affaires, les deux plus importants sont ceux de Wal-Mart Stores (421 milliards de dollars US) et d'Exxon mobil (354 milliards de dollars US). On tombe ensuite — si on peut dire — à 196 milliards de dollars US pour Chevron. Au 18^e rang pour le chiffre d'affaires, IBM est à 99,8 milliards de dollars US. La tranche des 10 milliards de dollars US et moins commence au 222^e rang avec Qualcomm (équipements de communication).

Avec un chiffre d'affaires de 4,3 milliards de dollars US, Seaboard (alimentation) ferme la marche des 500.

On peut retenir aussi que Procter & Gamble, le 26^e en chiffre d'affaires mais 11^e par les profits, affiche des profits équivalents au chiffre d'affaires de la 194^e société américaine, Aramark (services d'achat). Sans chercher à philosopher sur ces données, on peut retenir que la masse ne fait pas nécessairement le résultat. En revanche, elle contribue généralement à accroître le nombre d'emplois.

Pour nécessaire qu'ils soient, les profits ne suffisent pas, à eux seuls, à refléter le poids sociétal et le rôle de l'entreprise. En revanche, même les firmes bien classées en « masse » ne sont pas assurées de durer. On l'a bien vu avec General Motors qui a été longtemps premier par le chiffre d'affaires pour s'effondrer ensuite et qui ne reprend un rang digne de son passé qu'après une injection de capitaux publics, accompagnée d'une transformation du management et des distributions de ressources aux salariés et sous-traitants, qui n'avaient plus

grand-chose à voir avec la réalité de l'industrie automobile d'aujourd'hui comparée au laxisme des années 1970 où, pour obtenir la paix sociale, on engageait des dépenses que l'on était incapable de tenir sur la durée.

Par ailleurs, *Fortune* donne cette année la liste des « survivants » du classement de 1955. Des 10 premières compagnies en tête de ce classement 1955 figurent encore, en 2010, General Motors alors premier,

Les 31 entreprises ayant gagné des rangs en chiffre d'affaires dans le classement *Fortune* des 500 entre 1955 et 2011

	Rang	2011	1955
Abbot Laboratories	69	320	
Altria Group	154	218	
Archer Daniels Midlands	39	155	
Avon Products	226	455	
Bristol-Myers Squibb	131	419	
Caterpillar	58	75	
Chevron	3	18	
Coca-Cola	70	126	
ConocoPhillips	4	30	
Cummins	186	434	
Deere	98	104	
Dow Chemical	45	69	
Eaton	178	189	
Eli Lilly	115	253	
Hess	74	331	
IBM	18	61	
Johnson & Johnson	40	186	
Kimberly-Clark	130	177	
Marathon Oil	29	121	
McGraw-Hill	372	380	
Merck	53	212	
Motorola Solutions	116	156	
Northrop Grumman	72	183	
Paccar	238	356	
PepsiCo	43	364	
Pfizer	31	215	
Procter & Gamble	26	27	
Textron	233	292	
3M	97	131	
Whirlpool	143	185	

Source : *Fortune*.

Exxon Mobil deuxième, General Electric quatrième et DuPont dixième (en chiffre d'affaires de l'époque). Les six autres ont disparu du classement. Il s'agissait surtout de firmes sidérurgiques, de transformation, de distribution, ou de conglomerats, éclatés depuis. En revanche, parmi les 10 premières compagnies du classement 2010 (en chiffre d'affaires), cinq existaient déjà en 1955 : Exxon-Mobil deuxième en 2010, Chevron troisième, ConocoPhillips quatrième, General Electric sixième, et General Motors huitième, sauvée du désastre par l'État.

On notera l'importance du pétrole dans la tête du classement. Il apparaît clairement qu'il a joué et joue encore un rôle majeur dans la politique énergétique et économique, américaine et mondiale.

Si l'on examine l'évolution des 31 entreprises sur les 61 du classement 1955 qui ont gagné des places dans le classement, on trouve là encore des compagnies pétrolières comme Marathon Oil (passée de la 121^e à la 29^e place), mais aussi sept groupes pharmaceutiques comme Merck (de 212^e à 53^e). Assez curieusement, Procter & Gamble est resté presque au même rang (27^e en 1955 ; 26^e en 2010). 3M (Minnesota Mining and Manufacturing Company) est passée du 131^e rang au 97^e, PepsiCo a gagné des places sur Coca-Cola (PepsiCo : 364^e rang en 1955 et 43^e en 2010 ; Coca-Cola : 126^e rang et 70^e).

Mais la marque Coca-Cola continue d'être plus « mondiale ».

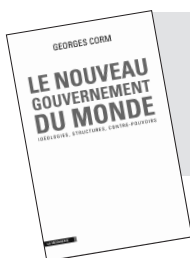
Entre 1955 et 2010, 439 nouveaux noms apparaissent dans le classement des 500. En réalité, le mouvement a été plus ample parce que chaque année, il y a des arrivées et des départs ou des rétrogradations. Ainsi Unisys, 452^e en 2009 est 521^e en 2010, tandis que Genzyme, 487^e en 2010, sera intégré dans Sanofi-Aventis (France) dans le classement 2011.

Autrement dit, si des « piliers » se maintiennent et parfois croissent comme Johnson & Johnson, d'autres tiennent la durée mais en changeant pratiquement de métier, comme IBM.

Ce mouvement permanent s'amplifiera encore dans les prochaines décennies avec l'apparition de nouveaux groupes en Chine ou au Brésil, par exemple. Le poids de ces groupes est et sera souvent lié à une activité. Les champions de la sidérurgie sont désormais plus en Inde et en Chine qu'aux États-Unis, les champions de l'automobile à forte croissance seront installés sur des marchés en fort développement. Partout, la pharmacie gagnera du terrain, comme les industries de communication, sans oublier les sociétés bancaires, d'assurance et financières. Par ailleurs, on sait bien que dans ces classements mondiaux, les non-Américains ou les non-Européens vont être de plus en plus présents.

M.D.

ANALYSES CRITIQUES & COMPTES RENDUS



CORM Georges

***Le Nouveau Gouvernement du monde
Idéologies, structures, contre-pouvoirs***

Paris : La Découverte (Cahiers libres), 2010, 300 p.

Depuis une trentaine d'années, la situation du monde n'a cessé de se dégrader, au moins sur deux plans essentiels. Le premier concerne la répartition de la richesse sur Terre. Elle n'a jamais été aussi inégale. Le produit intérieur brut par habitant atteint au Qatar 85 600 dollars US, 79 600 au Luxembourg et 46 300 dollars US aux États-Unis, contre 200 dollars US au Zimbabwe et 400 dollars US au Liberia. Le Qatar est ainsi en moyenne 428 fois plus riche que le Zimbabwe, alors qu'à la fin du XVIII^e siècle, avant l'envolée de la révolution industrielle, il aurait été impossible de trouver une nation deux fois plus riche qu'une autre.

Des centaines de millions d'Indiens et de Chinois connaissent une explosion de leur niveau de vie, mais au prix de la précarité et des très bas salaires réservés au plus grand nombre des ressortissants de ces pays. Dans les anciens pays industriels, les 10 % les plus riches s'enrichissent, pendant que l'écrasante majorité éprouve un tassement relatif de son

pouvoir d'achat. Aux États-Unis, par exemple, entre 1979 et 2003, les revenus des 5 % les plus riches ont progressé de 68 % (et de 45,6 % pour les 20 % les plus riches), contre 3,5 % pour les 20 % les plus pauvres.

Les choses ne sont guère plus favorables en ce qui concerne l'environnement de la planète. Si les engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre annoncés par un grand nombre de pays à la suite du sommet de Copenhague (fin 2009) étaient honorés, nous serions sur une trajectoire d'augmentation de la température moyenne à la fin du siècle de 4,5 °C.

L'état des ressources planétaires nécessaires à nos activités économiques — minérales et biotiques, en matière d'eau douce mais à une échelle locale —, ne laisse d'inquiéter. Le seul front où l'on dispose de réserves importantes est celui du charbon et des fossiles non conventionnels, ce qui n'est pas une bonne nouvelle pour le climat et qui ne pourra en outre que donner lieu à une augmentation des prix compte tenu des

difficultés d'extraction de ces énergies et du coût de leur transformation. D'ailleurs, depuis quelques mois, le prix du baril de pétrole, ceux des matières premières et des denrées alimentaires connaissent la même hausse rapide qu'en 2008. Or, la doctrine à laquelle on peut pour une grande part attribuer cette situation catastrophique est celle répandue par toutes les élites, celle que défendent un grand nombre de journalistes et de politiciens, à savoir le néolibéralisme.

Curieuse doctrine dont les racines remontent probablement très loin dans le temps. Georges Corm évoque quant à lui ces deux livres fondateurs que sont *Capitalisme et liberté* (1962) de Milton Friedmann¹ et *La Constitution de la liberté* (1960) de Friedrich Hayek². Quelles que soient les différences entre ces deux ouvrages, leurs richesses respectives, la doctrine néolibérale telle qu'elle s'est diffusée est remarquable par sa simplicité biblique, l'unilatéralisme, l'obsession anticommuniste et la brutalité de son credo.

Le passif de cette idéologie est d'ores et déjà effrayant : ce sont les Chicago Boys aux côtés d'Augusto Pinochet, derrière les plans de restructuration imposés par le Fonds monétaire international aux pays tiers qui ont broyé les populations et leurs aspirations, qui feront probablement autant merveille en Grèce et ailleurs. C'est la politique des taux d'intérêt élevés pratiquée par Paul Volcker, le patron de la Réserve fédérale américaine dans les années

1980, qui a condamné à la faillite les caisses d'épargne américaines locales et ruiné les pays tiers endettés. Ce sont les centaines de milliers (pour le moment) de retraités ruinés avec leurs fonds de pension, le scandale des subprimes et les familles expulsées de leur maison aux États-Unis, les primes astronomiques des traders, le dumping social des nations instauré en système international, etc. Enfin, c'est la dette écologique et sociale évoquée plus haut que nous paierons peut-être dans les décennies à venir par des centaines de millions de morts.

Et si tel devait être le cas, le bilan du néolibéralisme, déjà gigantesque en accumulation de souffrances sociales, écraserait celui du communisme. Et ce, au nom de la volonté de plier la réalité à quelques maigres modèles mathématiques, reposant in fine sur les sables d'interprétations fumeuses des réalités sociales, complètement coupées de celles du monde naturel, celui des ressources et des régulations de la biosphère. Un usage des mathématiques, soit dit en passant, qui n'a pas grand-chose en partage avec la pratique séculaire des sciences physiques.

Le plus grand intérêt du livre de Georges Corm est de rappeler les fondamentaux de cette idéologie, de tracer un bilan précis de ses conséquences multiples, de montrer par le menu la manière dont elle s'est petit à petit imposée à la planète entière, notamment via les prix Nobel d'économie, exclusivement décernés pendant une vingtaine d'années aux tenants de l'école monétariste, via désormais une multitude d'écoles de management et de business qui disséminent partout dans le monde des

1. *Capitalism and Freedom*. Chicago : University of Chicago Press, 1962.

2. *The Constitution of Liberty*. Chicago : University of Chicago Press, 1960.

élites formées aux mêmes doctrines sommaires et cyniques. L'auteur montre encore comment cette idéologie parvient à esquiver les questions importantes, comment elle est parvenue à forger et à asseoir une véritable oligarchie mondiale.

Georges Corm ne cesse, à raison, d'insister sur l'immoralité de cette doctrine et sur la nécessité de lui opposer un sursaut intellectuel, éthique et spirituel. Elle s'est notamment imposée en parvenant à vider toutes les réalités sociales, toutes les injustices, de leurs composantes éthiques et morales. Cette idéologie est parvenue à réduire à de simples questions techniques les scandales du monde contemporain : la pauvreté, les injustices, la destruction de l'environnement. « Tout cela, écrit-il, est désormais affaire de technocrates spécialisés

siégeant dans les instances internationales, et non plus de mobilisations citoyennes et politiques. » Il n'en va ni plus ni moins que d'un déni du mal. D'où d'ailleurs l'importance qu'il accorde aux grandes religions, et à leurs doctrines économiques et sociales, dans son inventaire des forces à opposer au néolibéralisme.

Il montre d'ailleurs, en se fondant sur divers auteurs américains, comment le monde que nous subissons est, par certains côtés, assimilable à l'extension à la planète entière des dysfonctionnements et turpitudes, et au premier chef du culte de l'argent, celui de la civilisation des affaires ravalant systématiquement le public au privé, qui tendaient à s'imposer dans la société américaine à compter des années 1960.

Dominique Bourg



FLICHY Patrice

Le Sacre de l'amateur. Sociologie des passions ordinaires à l'ère numérique

Paris : Seuil (La République des idées), 2010, 96 p.

Dans ce livre, Patrice Flichy, professeur de sociologie et spécialiste de l'innovation et des techniques d'information, s'intéresse à l'émergence de la figure de l'amateur. Selon lui, la généralisation d'Internet aurait contribué au développement de l'amateurisme dans trois domaines : l'art, la chose publique et la connaissance.

Plus de la moitié des internautes français se seraient déjà livrés à une activité d'autoproduction artistique. Les créations concernent en grande partie la musique et la photographie

numérique : en 2009, 10 milliards de photos sont accessibles aux amis des utilisateurs de Facebook.

Internet a transformé l'activité des fans. Les producteurs ne créent plus un produit mais un univers multimédia dans lequel les fans interagissent avec les éditeurs et définissent la forme du produit final (votes, avis, etc.) : la consommation n'est plus passive. Sur le site participatif « My Major Company », les internautes investissent dans un projet musical qui leur plaît et quand le projet recueille 7 000 euros, il est produit.

Selon P. Flichy, l'activité artistique des amateurs ne se construit pas en opposition à l'activité artistique professionnelle, il s'agit davantage d'une récupération / réappropriation des courants dominants.

Dans les espaces publics numériques (blogs, conversations, pétitions en ligne, etc.), les amateurs contestent le monopole des experts-spécialistes sur certains sujets et demandent une visibilité au sein de l'espace public. Il s'agit d'émettre une opinion, de témoigner d'une expérience personnelle ou de rendre visible un problème qui était inconnu ou ignoré.

Selon P. Flichy, les amateurs politiques ne remplacent ni les journalistes ni les élus, mais Internet agit comme un contre-pouvoir, il fournit aux amateurs un capital d'action politique. Les amateurs bousculent, interrogent, surveillent : ils deviennent visibles. Au moment des débats sur l'adoption de la Constitution européenne, les partisans du « oui » ont eu largement accès aux médias traditionnels, alors que deux tiers des sites qui ont parlé du référendum privilégiaient le « non ».

L'élévation du niveau de qualification des pays développés ainsi que la diffusion d'Internet ont permis une

extension des domaines de la connaissance. L'auteur définit l'encyclopédie libre Wikipédia comme une « forme de démocratie procédurale encadrée par tous » : chacun peut y contribuer dans la mesure où il respecte les règles du site (notamment de neutralité et de citation des sources).

L'expertise scientifique est également ouverte aux contributions des amateurs. Sur le site français Doc-tissimo, les connaissances médicales sont vulgarisées : le site compte 1,5 million de membres et reçoit 150 000 messages par jour. Les malades peuvent parler de leur expérience : il s'agit moins de contester les diagnostics que d'offrir des solutions pratiques pour gérer la maladie au quotidien.

Patrice Flichy conclut son livre par trois constats : l'amateurisme est une déclinaison de l'individualisme contemporain où chacun veut faire valoir son identité et sa singularité ; l'importance de la figure de l'amateur témoigne de l'existence d'un savoir éclaté constitué d'« îles d'expertises » ; enfin, l'émergence de l'amateur dans la société révèle une démocratisation de celle-ci où chaque individu possède une ou des parcelles de connaissance.

Laurie Grzesiak



DONNADIEU Gérard

**Manager avec le social
L'approche systémique appliquée à l'entreprise**

Saint-Étienne : éditions Aubin (Science et spiritualité),
2010, 423 p.

Lors des deux dernières décennies du XX^e siècle ont surgi des mutations politiques, économiques, technologiques

et sociétales qui ont périmé des organisations qui s'étaient pourtant révélées fort efficaces dans les environnements précédents. Le choix de Deng

Xiaoping de lancer l'immense peuple chinois dans la libre économie, la chute du mur de Berlin et l'irruption des centaines de millions d'acteurs de feu l'Empire soviétique sur le marché, l'irrépressible et incessante révolution des technologies de l'information et de la communication qui n'en finit plus aujourd'hui de transformer les relations collectives, la révolution généralisée de la consommation et de l'individualisme, allaient constituer, en peu d'années, un monde méconnaissable. Un monde marqué par la globalisation, les rétroactions souvent inattendues entre tous les facteurs — politiques, économiques, humains, scientifiques, technologiques, environnementaux — et, in fine, par une imprévisibilité qui rend caducs la plupart de nos critères de choix (gauche / droite, efficacité / inefficacité, coûteux / rentable...). Cela ne veut pas dire qu'il faille tomber dans un relativisme systématique et que ces valeurs n'aient plus aucun sens : mais nous ne sommes plus dans le même monde et les mots d'hier n'ont plus le sens d'autrefois.

Fascinés par ces transformations dont nous ne savions pas, alors, qu'au XXI^e siècle elles ne feraient qu'accroître leurs effets, nous avons été quelques-uns — bien rares à l'époque — à hurler dans le désert que les modèles pauvres de « spécialistes » du management américain étaient de plus en plus incapables de rendre compte des mutations qui se préparaient. Ils n'étaient pas nombreux, alors, ceux qui évoquaient l'approche systémique d'Herbert Simon¹, les réflexions de René Pas-

set², de Jacques Mélèze³, de Silvère Seurat⁴, d'Hubert Landier⁵ ou de Dominique Gévelot⁶. À l'époque, se référer à la pensée complexe et à Edgar Morin⁷, cela semblait fort intellectuel et peu en phase avec les réalités dures du business.

Le signataire de ces lignes avait d'ailleurs mis du temps à s'en rendre compte : le succès de librairie du Big Bang des organisations⁸ qui, précisément, proposait aux dirigeants d'utiliser les principes de la pensée complexe pour imaginer les nécessaires mutations des organisations productives dans un environnement imprévisible, le devait moins à une conversion des dirigeants à un nouveau style de pensée qu'au simple fait que son auteur était alors à la mode. Manager avec le social a su trouver le ton, le sérieux et le style d'une certaine intemporalité pour éviter précisément ce piège de la mode et demeurer, près de 15 ans

2. PASSET René. *L'Économique et le vivant*. Paris : Payot, 1979.

3. MÉLÈZE Jacques. *Approche systémique des organisations. Vers l'entreprise à complexité humaine*. Paris : éd. Hommes et techniques, 1979.

4. SEURAT Silvère. *La Coévolution créatrice. Une nouvelle alliance entre l'homme et l'entreprise*. Paris : Rivages / Les Échos, 1987.

5. LANDIER Hubert. *L'Entreprise polycellulaire. Pour penser l'entreprise de demain*. Paris : Entreprise moderne d'édition, 1987 ; et *Vers l'entreprise intelligente. Dynamique du changement et mutation du management*. Paris : Calmann-Lévy, 1991.

6. GÉVELOT Dominique. *Manager dans la complexité. Réflexions à l'usage des dirigeants*. Paris : Insep Consulting Éditions, 1992.

7. MORIN Edgar. *La Méthode*. Paris : Seuil, 1977-2004 (six tomes).

8. SÉRIEYX Hervé. *Le Big Bang des organisations. Quand l'entreprise, l'État, les régions entrent en mutation*. Paris : Calmann-Lévy, 1993.

1. SIMON Herbert. *La Science des systèmes, science de l'artificiel*. Paris : EPI éditeurs, 1974.

après sa première publication⁹, toujours d'actualité.

Rappelant comment la folie de la financiarisation avait introduit dans l'économie d'aujourd'hui un germe supplémentaire d'irrationalité, Gérard Donnadiou nous invite, dans une nouvelle édition de son ouvrage, à changer de regard et à adopter l'approche systémique de l'entreprise : ce regard et cette approche permettent d'apprécier combien la dimension humaine et sociale va devenir déterminante dans l'obtention des performances qui justifient et assurent l'existence des organisations productives publiques et privées (administrations, collectivités territoriales, entreprises...).

Gérard Donnadiou, de longue date, a enseigné ; aussi la structure de son livre est-elle fort pédagogique. Un premier chapitre présente l'approche systémique et ses éléments constitutifs ; les quatre chapitres suivants proposent une description systémique de l'entreprise en approfondissant plus particulièrement le sous-système social ; les trois derniers chapitres s'efforcent de traduire ces analyses en leçons opérationnelles susceptibles d'accroître l'efficacité de managers, de directeurs des ressources humaines et, en général, de tout acteur exerçant une responsabilité dans une organisation productive chaque fois que des personnes sont impliquées dans l'obtention d'une performance.

Le lecteur peut tirer au moins quatre bénéfices de cet ouvrage : un accès commode à la compréhension de l'approche systémique ; une revue très complète des riches apports de

presque tous ceux qui ont contribué à outiller ce que l'on appelle aujourd'hui la « pensée complexe » ; une perception neuve et originale des évolutions à l'œuvre dans l'entreprise et particulièrement dans sa dimension sociale ; des outils et des schémas d'analyse pour améliorer le management et la gestion des personnes et des groupes.

Comme l'annonce, en couverture, le sous-titre de l'ouvrage, il s'agit de « l'approche systémique appliquée à l'entreprise ». Bien qu'ainsi averti, le lecteur pourra trouver parfois qu'il y a un peu trop de systématisme dans l'utilisation de l'approche système tout au long d'un livre copieux et foisonnant. C'est la rançon de la rigueur. Qui n'a pas « l'esprit ingénieur » pourra regretter que manquent ici un grain de fantaisie, là quelques développements d'un ton plus politique. Petit bémol qui ne retire rien à la richesse de ce livre. Grâce à sa considérable culture, à la pertinence de ses analyses et à la diversité de ses expériences professionnelles, Gérard Donnadiou a signé là un ouvrage qui sera certainement appelé, dans ces temps troublés aux évolutions peu prévisibles, à devenir une référence dans ce domaine si évolutif et si complexe : celui du management des organisations humaines.

Comme le rappelle Bruno Tertrais¹⁰, dans un monde de plus en plus globalisé, aux interrelations de plus en plus complexes, il est difficile d'anticiper les moments de rupture, les « bifurcations aléatoires » et la totalité des sillages induits, singulièrement dans le champ social, le plus

9. Paris : Liaisons, 1997.

10. TERTRAIS Bruno. « Imprévisibles révoltes arabes ». *Le Monde*, 3 mars 2011.

sensible de tous. D'où l'importance de disposer d'un outillage intellectuel qui permette d'ajuster nos représentations mentales à ce qui peut se passer et à ce qui survient, pour imaginer des réponses neuves : quand on affronte les réalités de demain avec les représentations mentales d'hier, on est assuré d'accroître les dysfonctionnements d'aujourd'hui. Parce

qu'il nous donne une grille de compréhension des mutations à l'œuvre — et des futurs possibles — dans l'entreprise et qu'il nous permet de comprendre pourquoi l'économie sera de plus en plus tributaire du social, *Manager avec le social* est un livre important.

Hervé Sérieyx



MINC Alain

Un petit coin de paradis

Paris : Grasset, 2011, 100 p.

Ce bref ouvrage écrit d'une plume alerte est un fort utile antidote au pessimisme qui singularise les Français et, dans une moindre mesure, les Européens. Plus encore qu'au pessimisme, c'est à l'autodérision que s'en prend Alain Minc. Qu'il s'agisse de leur modèle social, de leurs libertés, de leur démocratie, de leurs institutions, celles des États mais aussi celles de leur Union, si décriées, les Européens ignorent leur exceptionnelle réussite.

Il est plaisant de voir celui qui, lors de la chute du mur de Berlin, prophétisait la fin du projet européen se faire le chantre très convaincant d'un système réunissant, dans une synthèse baroque, les héritages contradictoires de Jean Monnet et de Charles de Gaulle. Il lui semblait alors que l'Allemagne, sur le point d'obtenir sa réunification, se détournerait inévitablement du projet européen. Alain Minc ne revient pas sur cette prévision jusqu'à présent démentie par l'histoire, au moment même où le refus de payer pour des

partenaires prodigues génère outre-Rhin un inquiétant euroscepticisme. Son apport le plus original consiste dans une saisissante évolution comparée de la démocratie sur les deux rives de l'Atlantique.

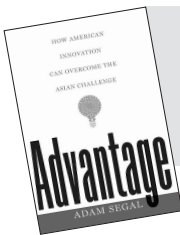
Naguère en avance sur l'Europe sur à peu près tous les terrains, les États-Unis apparaissent aujourd'hui retardataires. En témoignent la peine de mort, la justification de la torture, l'enseignement du créationnisme, le financement privé illimité des campagnes électorales, l'élection du président Bush Jr. arbitrée par la Cour suprême sans recompte des voix de la Floride, la résistance aux régulations financières, l'élargissement sans précédent des échelles de revenus, l'absence jusqu'à la récente législation de Barack Obama, si violemment contestée, d'un cadre général de protection sociale. La liberté d'expression est en définitive le seul domaine dans lequel la démocratie américaine peut se comparer avantageusement à celle des pays européens. Même pour le niveau de vie, statistiquement plus élevé outre-Atlantique, l'Europe

reprend l'avantage si l'on introduit des éléments qualitatifs.

Cette Europe, jadis foyer des pires conflits et mère des pires dictatures, est devenue terre d'équilibre et de liberté, pratiquant d'un bout à l'autre du continent l'économie sociale de marché. Les Européens deviennent politiquement plus homogènes alors que l'opposition entre libéraux et réac-

tionnaires se radicalise aux États-Unis. « Les Européens peuvent, pour la première fois de leur histoire, prétendre qu'ils n'ont "ni Dieu ni maître". Ils sont bien les seuls au monde à connaître cette situation bénie. Mais inconscients, une fois de plus, de leur propre réussite, ils n'en ressentent aucune fierté. »

Robert Toulemon



SEGAL Adam

Advantage: How American Innovation Can Overcome the Asian Challenge

New York : Norton & Company, 2011, 294 p.

Le titre a la vertu de la simplicité.

La prose est facile à lire. Et pourtant, c'est un ouvrage qui a toutes les caractéristiques d'un grand livre. D'abord par la question : face à l'Asie, les États-Unis ont-ils perdu le pouvoir technologique qui leur a permis de dominer le monde depuis la Deuxième Guerre mondiale ? Ensuite par le traitement du sujet : l'Asie, ce n'est pas tant le Japon ou la Corée du Sud, qui n'ont jamais été autre chose que des excroissances du système américain d'innovation, que les géants chinois et indien champions des superlatifs — masses économiques qui leur permettent de franchir des seuils déterminants de R&D à un niveau de produit intérieur brut (PIB) par habitant pourtant encore très bas ; masses humaines surtout, avec des centaines de milliers de diplômés du supérieur payés une fraction des salaires américains, et qui attirent de ce fait les leaders mondiaux des hautes technologies, notamment américains, dont les

centres de R&D se multiplient à Tianjin ou Bangalore. Grand livre aussi par le modèle théorique utilisé.

Adam Segal n'est pas le premier venu. C'est le grand expert américain du contre-terrorisme et des études de sécurité nationale au Council on Foreign Relations, et à ce titre un conseiller du président Obama, alors que les États-Unis connaissent un vif débat interne sur la meilleure façon de faire face à la concurrence chinoise et indienne. Au lieu d'un simple essai d'humeur comme souvent chez les élites françaises, Adam Segal mobilise les meilleures théories de l'innovation — qu'il circonscrit bien aux innovations de produits et non de procédés — et teste un modèle à trois tiroirs : le software qui prévaut sur le hardware ; la nature du régime politique selon qu'il domine ou simplement encourage l'innovation ; enfin, l'articulation entre le local et le global, où la capacité d'attraction de pôles d'innovation détermine la localisation à l'échelle

mondiale des activités à forte valeur ajoutée.

Le résultat de l'investigation d'Adam Segal tient en un constat simple. Oui, la crise de 2008 a révélé un modèle américain en crise où McMansion (l'immobilier), les dérives de l'endettement et de la finance casino, et le repli sécuritaire de l'ère Bush ont ébranlé les fondements du système américain d'innovation, alors que les deux géants « Chindia » mettaient au centre de leur stratégie le remplacement du made in par le innovate in. Ne parlons même pas de la Chine qui talonne déjà les États-Unis dans les nanotechnologies ou dans toutes les technologies vertes comme l'éolien ou le solaire.

Ce faisant, Adam Segal défend une thèse audacieuse : oui, l'innovation technologique sera au XXI^e siècle une source décisive de prospérité et de richesse des nations, le déterminant essentiel même. Mais le rôle cathartique de la crise de 2008 devrait donner au système d'innovation américain un coup de fouet : la preuve, la décision du président Obama de porter les dépenses de R&D à 3 % du PIB. Et l'hypercabilité du système d'innovation américain devrait lui permettre de recouvrer rapidement son leadership et son pouvoir technologique. Certes pas un pouvoir absolu, car l'auteur ne se fait pas d'illusions sur la montée des nouvelles puissances asiatiques qui ont pour elles l'avantage du pouvoir de marché et du capital humain, sans compter une culture scientifique séculaire, mais un pouvoir relatif.

Fini le monde unipolaire mais, à condition de jouer la carte de l'ouverture avec ces pays, l'avantage du

système d'innovation américain serait décisif sur ses concurrents asiatiques. En croisant des dépenses fédérales considérables, un tissu d'universités hors pair, et un tissu d'entreprises allant de la petite entreprise innovante bénéficiant de la première industrie mondiale de capital-risque, aux plus puissants groupes technologiques de la planète, « l'ingéniosité yankee » disposerait d'un avantage compétitif sur des géants handicapés par leur système politique (Chine) ou leur faible capacité organisationnelle (Inde). Le mot-clé semble ici la notion de système « collaboratif » qui n'est effectivement pas le point fort de l'Asie, Japon et Corée du Sud compris.

La thèse comporte de très nombreux arguments convaincants et une étude de 2009 du Samsung Economic Research Institute (SERI)¹ va tout à fait dans ce sens. Mais à défaut de relever du vœu pieux, on peut la relativiser autour de deux observations. D'abord, Adam Segal lui-même reconnaît qu'il s'agit d'une thèse conditionnelle. Cette reconquête du pouvoir technologique suppose que les partisans de l'ouverture (mondialisation) l'emportent aux États-Unis contre les thèses protectionnistes toujours plus populaires, notamment face à la Chine. À défaut, les pays asiatiques se refermeront eux-mêmes, conservant leurs avantages de marché et de capital humain, et jouant sur leur réel avantage dans les innovations de procédés pour remonter la filière des innovations de produits.

Ensuite, l'auteur discute lui-même ce qu'il appelle des « contingencies »

1. Voir le site Internet du SERI, www.seriworld.org.

de son modèle, c'est-à-dire la capacité des systèmes d'innovation chinois et indien à devenir plus efficaces en dépit des obstacles relevés. Pourquoi l'Inde ne pourrait-elle pas trouver un moyen spécifique de contourner son handicap organisationnel ? L'absence de liberté d'expression en Chine est-elle vraiment réhabilitaire et l'Allemagne nazie n'a-t-elle pas démontré une grande capacité d'innovation, hélas ?

On est enfin tenté de faire intervenir le grand absent de l'analyse d'Adam Segal : l'Europe. Celle-ci apparaît en bonne place dans l'étude citée du SERI, mais il est vrai qu'elle verrait son pouvoir technologique

s'estomper à l'horizon 2030 en faveur des deux grands géants asiatiques. Faut-il le prendre pour acquis ? L'auteur ne discute même pas le cas, comme si l'Asie-Pacifique était désormais devenue la seule mare technologicum du monde. On aurait au mieux aimé la voir dans la démonstration, ne serait-ce que pour confirmer sa propre thèse de l'ouverture, clef du renouveau technologique américain ; au pire pour que l'Europe sonne l'alarme aussi de son côté. Car évidemment, sans pouvoir technologique, on voit mal une Europe-puissance s'affirmer dans le monde de demain.

Jean-Joseph Boillot



TUBIANA Maurice

La Science au cœur de nos vies

Paris : Odile Jacob (Sciences), 2010, 316 p.

Du point de vue du prospectiviste, au-delà des évolutions techniques rendues possibles par la science contemporaine, avec les modifications évidentes dans nos sociétés, il est important de réaliser une évolution profonde de la perception des sciences par le public. Cette transformation, et pour lâcher le mot, cette méfiance vis-à-vis du progrès scientifique et technique, est d'autant plus préoccupante qu'elle semble bien le propre des civilisations occidentales, et ne pas être observée chez leurs concurrents directs comme la Chine. Ce simple fait est lourd de conséquences.

On peut regretter que la spécialisation de la science, rendue néces-

saire par une technicité grandissante, l'ait en quelque sorte progressivement exclue du champ des connaissances aisément accessibles à l'honnête homme. Le paradoxe est que cette marginalisation progressive de la science s'est produite alors même que son impact sur le quotidien allait croissant. La science s'est éloignée du citoyen au moment même où le public dépendait de plus en plus de ses conséquences.

Cet éloignement de la science vis-à-vis de ses premiers bénéficiaires, mais aussi le développement de médias friands de spectaculaire conduisent à renoncer, dans le débat public, à l'argumentation scientifique, pour lui substituer l'incantation anxigène, sur les OGM (organismes

génétiquement modifiés), sur les radiofréquences, sur le nucléaire. Au XIX^e siècle, en France, La Revue des deux mondes accueillait en première page Foucault pour rendre compte des séances de l'Académie des sciences : imagine-t-on cela aujourd'hui dans Le Monde ou Le Figaro ? Les foules se rendaient au Panthéon pour voir la preuve de la rotation de la Terre et il fallait agrandir l'Observatoire pour les cours d'astronomie populaire d'Arago. On voit aujourd'hui le Palais de la découverte (Paris), construit pour éclairer, devoir céder la place au musée de La Villette, construit pour éblouir.

Comment ne pas s'inquiéter de voir à quel degré d'indigence se trouve la culture scientifique des hommes politiques, que ce soit sur les ressources énergétiques, dans la gestion de la crise de la grippe H1N1 ou de celle de la « vache folle ». Énergie, santé, deux domaines de toute première importance politique, où la science est une pièce maîtresse et où l'ignorance est patente. Le politique n'a plus les connaissances élémentaires en science qui lui permettraient de distinguer une argumentation scientifique d'une plaidoirie démagogique, le grand public, abreuvé à satiété d'informations approximatives en est arrivé au stade des « demi-savants » que craignait Pascal : pas assez instruits pour savoir et trop informés pour reconnaître leur ignorance.

Il en résulte, paradoxalement, que la compétence et l'expertise, au lieu de donner valeur à un avis, sont devenues disqualifiantes. Tout le monde peut avoir un avis sur les OGM sauf les généticiens, sur le nucléaire sauf les physiciens, sur les effets potentiel-

lement nocifs des ondes électromagnétiques sauf les médecins. Toujours les médias s'adresseront au militant et jamais à l'expert. Le glissement observable de la prévention, qui est légitime, à la précaution, qui en est la forme sénile, cette dégradation de l'expert au militant sont lourds de conséquences sur la capacité des États à construire leur futur.

Dans son récent livre *La Science au cœur de nos vies*, Maurice Tubiana nous appelle à la vigilance vis-à-vis de ce qu'il faut bien appeler une résurgence de l'obscurantisme. Mais son cri d'alarme ne sera entendu que si le citoyen se réapproprie la démarche scientifique, et ce livre incarne une volonté de redonner au lecteur cultivé le moyen de comprendre comment fonctionne la science. Ce n'est pas toute la science, bien sûr, qui est couverte dans ce livre, mais le fait même que la physique, la biologie et la médecine soient les exemples choisis, donne assez le ton de l'ouvrage : offrir, par des exemples variés, une vue d'ensemble de ce qu'est la démarche scientifique.

L'auteur est connu pour ses positions courageuses, souvent à contre-courant, aussi bien sur les dangers réels, la lutte contre le tabagisme ou la nécessaire vaccination contre l'hépatite B, que sur les peurs irrationnelles concernant l'énergie nucléaire, les risques hypothétiques des OGM, les craintes hallucinées des électrosensibles. S'il y a quelqu'un qui connaît la différence entre prévention et précaution, c'est bien lui.

Il a écrit ce livre pour ses arrièrepetits-enfants, pour leur « expliquer la science ». Mais c'est aussi aux adultes curieux de savoir ce qu'est la science qu'il faut en recommander la

lecture. Avec le chapitre sur la physique, le lecteur non spécialiste est amené à découvrir, de la science grecque à la physique contemporaine, une claire idée des questions et des méthodes de cette discipline. Avec celui sur la biologie et la médecine, il nous montre comment la biologie moléculaire a révolutionné un champ que Claude Bernard et Pasteur avaient profondément transformé. Ce n'est pas à une histoire universelle des sciences que Maurice Tubiana nous invite, mais à une familiarité avec la démarche scientifique.

Après ce jubilatoire tour de force de culture scientifique, le troisième chapitre est plus grave. Après avoir montré à quel point la science est au cœur de notre quotidien par ses réalisations pratiques, il nous montre combien elle devrait être au cœur de

nos réflexions de citoyens. On est à mille lieues du scientisme caricatural. La science est tout sauf un corpus de dogmes, c'est une démarche de remise en cause permanente, une analyse des théories au dur tribunal des faits, une évaluation de leur capacité à donner une analyse cohérente d'un corpus d'observations, et non une sélection biaisée de celles qui « iraient dans le bon sens ». Une discussion scientifique n'est pas un plaidoyer pour une cause. Dans le tumulte médiatico-politique qui accuse la science de tous les maux, il est heureux que se trouvent encore de grands savants comme Maurice Tubiana pour nous rappeler simplement et clairement qu'elle est aussi génératrice de solutions à nos problèmes.

Yves Bréchet



MANACH Jean-Marc

La Vie privée, un problème de vieux cons ?

Limoges : Fyp, 2010, 224 p.

La vie privée est-elle un concept dépassé ? C'est en tout cas devenu un paradoxe, selon l'auteur de cet ouvrage : alors que les internautes sont de plus en plus nombreux à publier sur Internet des informations intimes et leurs photographies de vacances, le sentiment d'être surveillé et fiché n'a jamais été aussi présent.

Les plus jeunes, notamment, auraient totalement renié la notion de vie privée, publiant en permanence des informations sur leurs activités du moment, leurs relations amou-

reuses et leurs loisirs. Pourtant, comme le montre Jean-Marc Manach dans ce livre, les évolutions de la vie privée sur Internet sont plus complexes qu'elles ne le paraissent. Car cette génération des « transparents » ne fait que reproduire le modèle transmis par la génération des « parents » : une surveillance permanente de leur vie privée, de la première échographie au contrôle de leur ordinateur ou de leur journal intime...

Exposés en permanence au regard des adultes, les jeunes trouveraient donc sur Internet un espace

paradoxal de liberté, tout en cherchant à y reproduire la sensation d'être « au centre de la scène ». Leur notion de la vie privée est donc très différente de celle de leurs parents, mais n'en reste pas moins réelle. Les jeunes sont d'ailleurs les mieux informés des moyens leur permettant de se protéger sur le Web, et sont de plus en plus nombreux à les utiliser.

Surtout, selon l'auteur, la question de la protection de la vie privée ne doit pas être résumée à un problème générationnel, car elle concerne

tous les internautes et relève d'enjeux beaucoup plus importants. Il s'agit en effet de veiller à maintenir la vie privée, garante des libertés individuelles, en fixant des limites à la société de la surveillance, que cette surveillance soit le fait des pouvoirs publics, d'entreprises, ou de pairs eux-mêmes. D'où les propositions de l'auteur pour apprendre à protéger ses données numériques et à limiter les traces de ses activités sur Internet.

Cécile Désaunay

futuribles - no. 376 - July-August 2011

Energy Demand Scenarios: a Critical Retrospective. Lessons from the Past for Exploring the Future

*Marie-Hélène Laurent,
François Cattier, Dominique Osso
and Prabodh Pourouchottamin*

In his article on oil and gas prospects published last April (no. 373), Jean Laherrère showed (p. 25) how natural gas forecasts in the USA since 1985 have turned out to be far removed from the actual development subsequently recorded. Such retrospective comparisons are quite rare, if only because the forecasters and other drafters of long-term planning studies prefer to look to the future rather than the past. However, as is shown in this article by Marie-Hélène Laurent, François Cattier, Dominique Osso and Prabodh Pourouchottamin who have attempted to carry out such a retrospective analysis of foresight studies on energy demand, such comparisons have a great deal to teach us.

After specifying the nature of the studies analysed (forecasts, foresight studies, projections), what they cover and the way they were elaborated (the use of a reference scenario in particular), the authors – though cautious as to the relevance of such retrospective comparisons – ask themselves three questions. First, was the study wrong and, if so, to what extent and in what direction? Then, why was it wrong? They show, for example, the various types of possible error (trajectory, trend, variability etc.) and their impact, the importance of the quality of hypotheses and of the profile of the authors involved, and the lessons that ensue. Lastly, posing the question of the seriousness of the errors found, Laurent *et al.* seek to put things into perspective: on the one hand, retrospective comparisons help to refine the analysis and reduce the potential risks of error in such exercises; on the other, they enable us better to grasp consumption systems dynamically, to identify the sectors in which it is most difficult to bring about change, and to refine the timescales of the measures to be implemented – the key element in all foresight studies being that the hypotheses and scenarios should be communicated with the greatest possible transparency.

Renewable Energies: How Far Can We Go?

Cédric Philibert

A little over five years ago, in January 2006, *Futuribles* devoted a sizeable special number to energy prospects and the greenhouse effect (no. 315). These were already troubling times and the gloomy prospects for the development of energy resources and the problematic of climate change were analysed in a number of articles. According to certain experts, “peak oil” was already reached in that same year of 2006: that is to say, oil production was thought to be at its height and would subsequently be stagnating before a (more or less rapid) decline. Furthermore, gas production ought to reach a ceiling around 2025-2030, as Jean Laherrère showed in these columns last April (no. 373). In this context and given the undeniable efforts to be made to limit global warming, it has become essential, on the one hand, to act to control energy use and, on the other, to look to other sources of energy production – this second option being doubtless easier to implement than reducing consumption. Incontestably, renewable energies have an essential future role to play in the diversification of the energy mix and its orientation towards sustainable development. Cédric Philibert, a specialist in these forms of power within the International Energy Agency, here outlines their potential and the place they might occupy in years to come.

After presenting the IEA’s scenarios to 2035 and 2050 (which reveal the need for proactive policies to promote renewable energies), he focuses on the two major strands in this sector: wind power and solar energy. He then goes on to the question of what is meant by “renewable”: are these energies 100% renewable or have the supplies to be supplemented, the resources to be stored etc.? He analyses the role renewable energies could play in buildings and in the various sectors of industry and transport and under what technical conditions this might occur.

Lastly, Philibert examines the economic aspects: what costs for what benefits? He

shows, in substance, that, though the initial investment required is large (particularly in terms of incentive measures on the part of the public authorities), the game is certainly worth the candle in the long term, since “the massive deployment of renewable energies seems to be the key today” for responding to global energy needs and combating climate change.

Energy Efficiency in the Mediterranean Building Industry

*Henri-Luc Thibault
and El Habib El Andaloussi*

Despite the alerts that have been sounded since 1992, as international conferences aimed at curbing global warming have come and gone, and despite the plans for reducing the use of fossil fuel resources that call for the moderation of energy consumption, few actions or incentive measures (and even fewer directives) have actually been developed to act on the demand for energy. Yet, as Henri-Luc Thibault and El Habib El Andaloussi show here, some very concrete measures can have major effects in this area. This is the case with everything relating to the improvement of energy efficiency in building, where housing conditions, the housing stock and related energy consumption (heating, air-conditioning etc.) are concerned. Thibault and El Andaloussi show the potential impact of such measures in the Mediterranean region.

Basing themselves on the work of the “Plan Bleu” organization, which has worked out a revolutionary scenario for the energy field in the countries of the southern and eastern Mediterranean (to 2030), they begin by recalling the importance of buildings in regional energy consumption and the various levers that might be used to reduce that consumption (regulation, materials, efficiency of machinery etc.). In such a scenario, the potential for energy savings in this sector would seem considerable. Moreover, this would enable a substantial decrease in greenhouse gas emissions to be achieved, and would also have very positive effects in terms of job creation.

In conclusion, the authors point out the need for investment over 20 years, depending on the particular country concerned, to put in place the five flagship measures of energy saving, which would be genuine investments for the future...

Négatep: A Scenario for Combating Global Warming

Claude Acket and Pierre Bacher

There have been an increasing number of foresight exercises in the field of energy and global warming in recent years, as we have seen from the articles devoted to these questions by *Futuribles* in 2011 (both in this special issue and in the April number). It is certainly the case that the goals for greenhouse-gas emission reduction are rather ambitious, particularly in France, it being the aim of the 2005 French framework law on energy to reduce carbon gas discharges by a factor of four.

Among these scenarios, the Négatep scenario developed by Claude Acket and Pierre Bacher from the “Sauvons le climat” [Let’s save the climate] Association proposes to achieve this (“factor 4”) goal in France by 2050 by reducing fossil fuel use by 75% and replacing this as quickly as possible with electricity produced from non-carbon-gas-emitting sources – chiefly, nuclear power and renewables. The authors lay out their goals here, backed up by figures, comparing these with the reference scenario. They also show the path that must be followed to arrive at these goals, particularly in the residential and tertiary sectors, and in transport and industry (through control of needs and recourse to alternative energy sources).

They close by comparing the Négatep scenario with two other more recent scenarios aimed also at reducing greenhouse gas emissions, on the one hand in Europe, and on the other in Germany. The comparison confirms that they were right to rely on electricity as a substitute for oil, but gives them cause for concern in respect of the consequences (formidable in their view) that the replacement of nuclear power and coal energy by intermittent renewable energies might have in Europe, both with regard to costs and to the effects on the power network.

Is the NégaWatt Revolution Achievable? Promises and Limits of a Revolutionary Scenario

Bernard David

In the increasingly alarming context of the exhaustion of fossil fuels and global climate change, various foresight exercises have been conducted in recent years with the aim of determining alternative paths for

energy production and consumption. Among these, a scenario relating to France – the négaWatt scenario – was published in 2003, and then updated in 2006. It proposed radical change in this field, based on three main levers: energy conservation, energy efficiency and the development of renewable energy sources.

In the early days of 2007 *Futuribles* called on the authors of this scenario to outline this original work in the journal, but despite contacts and follow-up efforts, some of them as part of the preparation of this special issue on energy problems, it has not proved possible to obtain an article from those responsible for the négaWatt scenario. It is, in fact, Bernard David, who has kindly agreed to pen a critical analysis of this work for *Futuribles*.

He outlines the basic elements of the négaWatt scenario here and describes its originality but also its limitations. He highlights, in particular, various essential questions for arriving at an overall ecological assessment of the solutions advocated by négaWatt, in order to satisfy himself that they do not lead to indirect consumption or pollution likely to counterbalance the expected energy savings (this is why life-cycle analyses are so valuable).

Obviously, we regret that the “négaWatt” Association was not able to present its work and its scenario itself, and we hope that the questions raised by Bernard David will encourage it to do so in these pages in the near future.

Agriculture/Energy Foresight to 2030: How will Agriculture Adapt to Future Energy Challenges?

Céline Laisney, Fabienne Portet and Julien Vert

Like all other economic activities, agriculture consumes energy; it is also, however, increasingly productive of energy (through biomass and biofuels, for example). In an energy context that is rapidly changing on account of the exhaustion of fossil resources and the battle against global warming, it is essential to be able to envisage the agricultural sector's take – and that of its major players – on energy-related challenges. This is why the French Ministry of Agriculture's Centre d'études et de prospective launched a broad foresight study in 2009-2010 entitled, “Agriculture Energy 2030”, the central

lessons of which are reported here by Céline Laisney, Fabienne Portet and Julien Vert.

After an assessment in which they specify the links between agriculture and energy in France and stress the various medium-to-long-term issues in the field, the authors outline this foresight study and the four scenarios to which it gave rise. These four contrasting scenarios, each translated into figures, describe the probable developments of French agriculture in various energy contexts up to 2030. They are termed, respectively, “Territorialization and Energy Conservancy in the face of Crisis”, “Dual Agriculture and Energy Realism”, “Health-Agriculture without Strong Energy Constraints”, and “Ecological Agriculture and Energy Management”. Highlighting the difficulties to come, but also the opportunities available to the agricultural sector, these scenarios provide the public authorities with new elements to feed into their agricultural strategy, indicate the existing scope for manoeuvre and enable general objectives and various possible levers of change to be identified, depending on the lines of action preferred.

Nuclear Power: A Solution for the Future or from the Past?

Corinne Lepage

On 11 March 2011 Japan suffered an earthquake of very great magnitude, followed by a tsunami that killed thousands in the Sendai region and, most importantly, led to a major nuclear disaster at the Fukushima power station. This nuclear accident ranked at the highest level of severity on the international scale of nuclear events, making it the biggest since Chernobyl in 1986. It is still impossible to gauge the precise scope of the economic, health and human consequences of this disaster, but it is clear that it has triggered most intense debates on the nuclear issue once again.

Even if nuclear disasters of this severity are relatively rare, are we justified, given the consequences that follow, in continuing to resort to this energy source which, though admittedly it emits little “greenhouse” gas, produces much highly dangerous waste that often remains toxic for more than a century? In this summer issue devoted entirely to energy questions, *Futuribles* raises this question in its “Forum” column.

Corinne Lepage, a specialist in environmental questions and former French environ-

ment minister, offers us her point of view here, in substance taking the view that the human, ecological and financial dangers are much too great to be risked, particularly in a world where sources of renewable energy can now largely meet the energy and climate challenges with which we must contend.

Nuclear Power after Fukushima

Bernard Bigot

On 11 March 2011 Japan suffered an earthquake of very high magnitude, followed by a tsunami that left thousands dead in the Sendai region, the main consequence of which was a major nuclear disaster at the Fukushima power station. The accident ranked at the highest level of severity on the international scale of nuclear events, making it the biggest since Chernobyl in 1986. It is still impossible to gauge the precise scope of the consequences of the disaster, but it has clearly given rise to the most intense renewed debates on the nuclear issue.

Futuribles echoes this in the “Forum” feature of this summer issue which is entirely devoted to energy questions. Bernard Bigot, chief executive officer of the technological research organization CEA, looks back on the Fukushima disaster and what it changes (or doesn’t change) so far as the use of nuclear power is concerned, particularly in France. After recalling the lessons of earlier nuclear disasters, which led to the development of the third generation of power stations, he reminds us of the currently uncontested need to free ourselves from dependence on fossil fuels, which admittedly involves increased use of renewables, but can scarcely be envisaged without nuclear power.

Lastly, where the Fukushima disaster is concerned, Bernard Bigot shows how it was, in his view, predominantly the product of a management error, from which lessons must be drawn to improve the safety conditions of existing or projected power stations and enable the staff responsible to deliver the right response as quickly as possible when an accident occurs. In this context and given France’s high level of dependence on nuclear power, the level of use of this energy source ought not to be reduced on account of the events of March 2011.

The Consequences of the Fukushima Accident

Michel Drancourt

On 11 March 2011 Japan suffered an earthquake of very high magnitude, followed by a tsunami that left thousands dead in the Sendai region, the main consequence of which was a major nuclear disaster at the Fukushima power station. Given its seriousness (the highest level on the international scale of nuclear events), the accident revived the fiercest debates between supporters and opponents of nuclear power, debates echoed by *Futuribles* in the “Forum” feature of this special issue. Without taking sides in the debate, Michel Drancourt has his say on the question, attempting to gauge the consequences of the disaster for both Japan and the world.

He starts out from an article published in *Futuribles* more than 20 years ago (no. 136, October 1989), which laid out the conclusions of a report by the Tokai Bank on the potential economic consequences of an earthquake in Tokyo. As he stresses, the situation has changed and Japan no longer occupies the central place in financial and commercial dealings that it did in the 1980s; nevertheless, the country remains an importer and major supplier of many products, and a weakened Japan will have consequences industrially, politically and economically for the rest of the world. As for the comparison of the 1989 scenario with the 2011 reality, one of the lessons to be learned is that the scenario would not have been far wrong if the earthquake had not been accompanied by the tsunami and the subsequent nuclear accident. Hence two longer-term conclusions: in foresight exercises, we should not work on the basis of a single, isolated risk; and, most importantly, sources of energy production should be diversified as greatly as possible.

Europe and its Energy Objectives

Jean-François Drevet

Chiming in with the central theme of this summer issue, in this article Jean-François Drevet provides a presentation of the main aims of EU policy in the field of energy. After reminding us that there is, strictly speaking, no common energy policy in Europe, he outlines the four major challenges confronting the Union in this area: energy savings, the production of renewable energy

(with the declared aim of covering 20% of final consumption from renewable sources by 2020), the reduction of greenhouse gas emissions (for which the declared targets are particularly ambitious) and, lastly, problems of energy security (particularly, the question of energy supplies to those countries most dependent on external provi-

sion). In all these fields it is, once again, the strength of a united community that can make the difference, though this presents another substantial challenge, given the increasing distrust of consumers, who tend to ascribe recent energy price increases to market liberalization brought about in recent years under the aegis of the EU. ■

Futuribles is a monthly independent transdisciplinary policy oriented journal (11 issues a year), also available in electronic form on the *Futuribles* website. Its objective is to provide its readers with a better understanding of contemporary societies dynamics, those facts, ideas and trends shaping their medium and long term possible futures.

Chief Editor : Hugues de Jouvenel

Futuribles : 47, rue de Babylone, 75007 Paris, France. - Tel. : 33 (0)1 53 63 37 70 - Fax : 33 (0)1 42 22 65 54
E-Mail revue@futuribles.com - Website www.futuribles.com