

# ENERGIE ET ECONOMIE

## QUELQUES PISTES DE REFLEXION

*Arnaud Diemer*  
IUFM, Auvergne

Alors que la France a lancé au dernier trimestre 2007 une vaste réflexion, qualifiée de « *Grenelle de l'environnement* » et que les autorités européennes peaufinent leur projet de directive cadre, les automobilistes européens et américains ont le regard rivé sur les prix affichés par les stations d'essence. Après un pic avoisinant les 98\$, il semblerait que la question énergétique se réduise à un simple constat : celui de voir les prix de l'or noir oscillaient dans des limites toujours plus importantes. Si le problème énergétique ne se limite pas au marché du pétrole, force est de constater que son évolution focalise l'attention des décideurs politiques, des consommateurs, des chefs d'entreprises (défaut de trésorerie du transport maritime et de l'activité pêche)... Au-delà de ce simple constat, on pourrait se poser la question suivante : *la hausse du prix du pétrole serait-elle une fatalité ou une chance pour nos sociétés ?* Pour répondre à cette question, nous procéderons dans un premier temps à un état des lieux, quels sont les faits observés et quels sont les outils mobilisés par les économistes ? Dans un second temps, nous évoquerons quelques pistes de réflexion et quelques illustrations.

### I. LA QUESTION ENERGETIQUE : ETATS DES LIEUX

Toutes les enquêtes d'opinion (SOFRES, Unilog Management...) tendent aujourd'hui à le montrer. Au même titre que les prix, la problématique environnementale occupe une place importante dans les critères de choix des consommateurs. En France, un sondage réalisé en mai 2007 par Unilog Management et l'institut TNS la SOFRES soulignait que pour 45% des personnes interrogées, l'engagement d'un fournisseur d'énergie pour la protection de l'environnement était une condition essentielle. Dans les faits, la question énergétique s'est traduite par deux types de débats, l'un, plus environnemental, tente d'établir des plans de vie en société à plus ou moins long terme, l'autre plus économique, renvoie au fonctionnement du marché du pétrole et aux conséquences d'une hausse des prix pour la croissance mondiale. Les économistes, plus attachés à cette seconde grille de lecture, disposent d'une boîte à outils relativement sophistiquée. Cependant, de nombreuses clés du problème leur échappent encore.

#### **A. Deux manières d'aborder la question énergétique**

Du point de vue environnemental (et politique), il s'agit de penser aux alternatives au pétrole (bio carburants, énergie solaire, énergie éolienne, énergie hydraulique...) mais également de poser les bases de ce que l'on appelle aujourd'hui le « *développement durable* ». Dans son pré-rapport (octobre 2007), la *Commission pour la Libération de la croissance économique*, présidée par Jacques Attali, a suggéré la création avant 2012 de dix Ecopolis, villes d'au moins 50 000 habitants intégrant haute qualité environnementale et nouvelles technologies de communication.

Aux dires de ce rapport, l'aspect environnemental<sup>1</sup> de ce vaste chantier serait fondamental : « *Ces espaces urbains durables devront intégrer emploi, logement, cadre de vie et mixité sociale et mettre en œuvre des ressources énergétiques renouvelables... Ils joueront aussi le rôle de laboratoire de la réduction de la consommation d'eau, du tri des déchets, du développement de la biodiversité, de la réduction de la consommation d'air conditionné, de l'aménagement de plans d'eau...* » (2007, p. 24). De nombreux pays en ont déjà l'expérience : *Mountain View* en Californie, *Hammerdy Sjöstat* en Suède, *New Songdo City* en Corée. En Angleterre, le chancelier Gordon Brown a lancé son projet de construction de 10 *Ecotowns* (villes de 10 000 à 20 000 habitants).

D'un point de vue économique et financier, l'énergie (et son prix) dépend du prix du pétrole brut. Le pétrole étant la source d'énergie dominante et son prix reflétant l'équilibre entre l'offre et la demande au niveau mondial, il s'agit de suivre l'évolution des marchés de matières premières. Il convient ici de repérer les grandes tendances du marché du pétrole et d'apporter une explication aux mouvements erratiques du prix de pétrole. En d'autres termes, pourquoi le prix du pétrole est à 93\$ ou 94\$ ? Et quelles seront les conséquences d'une telle hausse en matière de croissance économique ? Dans ces conditions, l'économiste se « contentera » :

(1) de constater l'inadéquation entre l'offre et la demande. A la question (le prix du baril a plus que doublé depuis 2004 et frôle les 80 dollars US. Pour quelles raisons et quelles sont les conséquences sur la demande ?), l'économiste François Lescaroux de l'IFP (Institut Français du Pétrole) répondait en octobre 2007 « *La hausse du prix du brut résulte simplement de la confrontation entre offre et demande. Alors que les besoins en pétrole continuent à s'accroître à un rythme élevé à travers le monde (tirés par la forte croissance économique des pays émergents, Chine et Inde en premier lieu), l'approvisionnement a du mal à tenir la cadence. Par conséquent, l'équilibrage entre consommation et production s'opère par un renchérissement des produits pétroliers* » (Les Echos du 14/09/07).

(2) de regretter que les pays de l'OPEP n'aient pas augmenté leurs quotas de production de manière significative (depuis le 1<sup>er</sup> novembre 2007, les pays de l'OPEP ont augmenté leur production de 500 000 barils par jour<sup>2</sup>) et d'observer la parité \$/€ (en effet, tout dérapage du billet vert, incitera les pays producteurs de pétrole à relever leurs prix en réduisant les volumes de production)<sup>3</sup>.

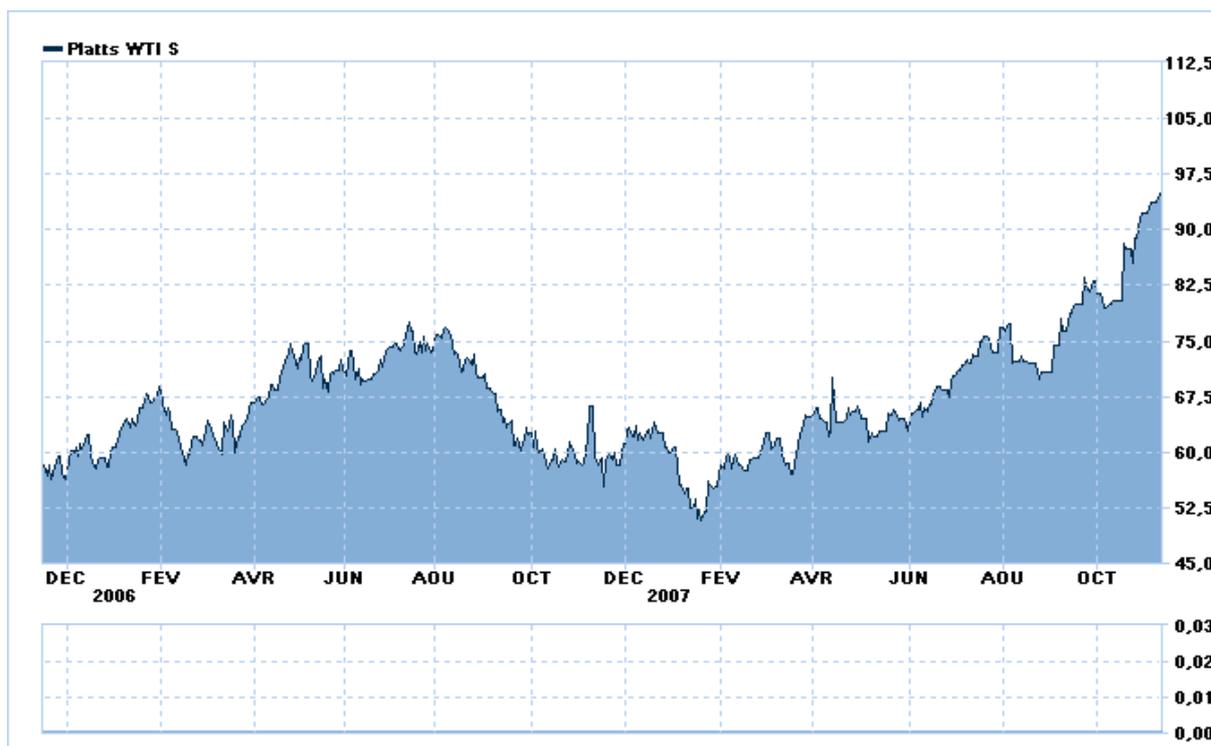
---

<sup>1</sup> Les habitations contribuent par leur construction puis par leur utilisation à plus de 20% de la production de gaz à effet de serre. Le bâtiment constitué de logements, des immeubles de bureaux, des commerces et équipements publics ou privés absorbent environ 46% de la consommation d'énergie totale de la France avant le transport (30%) et l'industrie (25%).

<sup>2</sup> Pour l'Agence internationale de l'énergie, cette décision n'aurait qu'une portée symbolique. Pour répondre à la demande mondiale, il faudrait que les pays de l'OPEP fassent passer le niveau de leur production de 30.4 millions de barils par jour à près de 32.4 millions.

<sup>3</sup> Depuis 2005, la corrélation entre le cours du dollar et le baril de WTI n'a cessé d'évoluer pour passer de 26% à 60% pour finalement atteindre 78% en 2007. Ceci est dû principalement aux politiques des banques centrales des principaux pays exportateurs de pétrole qui ont adopté une gestion différente de leurs réserves de change. Elles ont diversifié leurs réserves et ne souhaitent plus détenir uniquement des dollars. Les contrats pétroliers étant libellés en dollars, elles en ont revendu une partie pour acheter des yens ou des euros, ce qui a généré une pression à la baisse de la devise américaine. Ainsi, plus le baril monte, plus le dollar est déprimé...

*Fig 1 : Cours du pétrole (WTI Spot intraday Indication) en \$*



*Source : Marchés financiers, XTWI, 12 novembre 2007*

(3) d'évaluer les prévisions de production à moyen et long terme. Sur ce point, les spécialistes semblent diviser. Si l'agence internationale de l'énergie (AIE) considère que l'offre pourra suivre la demande jusqu'en 2030, voire au-delà ; les géologues membres de l'Association for the Study of Peak Oil and Gas (ASPO) situent le pic pétrolier en 2010. Les réserves prouvées, c'est-à-dire la quantité de pétrole que l'on peut - en l'état de la technologie et de la connaissance des gisements - extraire du sous-sol dans des conditions techniques et économiques raisonnables, s'élèvent aujourd'hui à 40 années de notre consommation actuelle. Même en temps compte de la hausse de la consommation, on peut ainsi estimer qu'il n'y aura pas de problèmes de pénurie avant 2030. L'approvisionnement en matière de pétrole devrait se concentrer dans les pays de l'OPEP. L'Arabie saoudite détient à elle seule 25% de ces réserves et l'ensemble des pays de l'OPEP 70%. Vers 2010-2015, les pays non producteurs de l'OPEP devraient enregistrer une baisse de leur production. Ainsi la croissance de la demande ne sera assurée que par les pays membres de l'OPEP ou par l'exploitation plus complexe et coûteuse de pétroles lourds. Ce déplacement vers les pays producteurs de l'OPEP pourrait bien remettre en cause le fonctionnement du marché international du pétrole (régulation de l'offre et de la demande). Jusqu'ici, le marché permettait de concilier le développement des pays consommateurs en leur garantissant un prix de l'énergie raisonnable et la rente des pays producteurs en limitant le recours à des technologies alternatives.

Bonenfant et Kueny (2007, p. 46) précisent que ce problème prend une dimension particulière dans la mesure où « l'amont pétrolier est très majoritairement contrôlé par les compagnies nationales des pays producteurs, pour la plupart fermés aux investissements

*étrangers (Arabie Saoudite, Koweït, Mexique...)<sup>4</sup> » et où « les pays producteurs peuvent différer leurs investissements pour lisser leurs rentrées financières dans le temps ou même entretenir une pénurie contrôlée et maintenir ainsi un cours à un niveau élevé ».*

(4) de repérer les points de tension sur le marché du pétrole. Il s'agit par exemple de cerner les principales routes stratégiques du pétrole (62% de la production mondiale transite pas tankers, près de 170 bateaux empruntent chaque jour le détroit de Malacca); la mise en place des pipelines (pétrole russe) ou les spécificités des produits (il est peu économique de transporter des produits finis, par conséquent l'outil de raffinage doit être adapté à chaque marché<sup>5</sup>).

Le pétrole est donc au cœur du débat sur l'énergie

## **B. Outils de l'économiste**

Les économistes disposent aujourd'hui d'une batterie d'outils pour expliquer les phénomènes économiques, monétaires et sociaux. Concernant la question énergétique, cette boîte à outils prend les traits suivants :

- Analyse portée sur le calcul économique. Il s'agit ici de partir des comportements des agents économiques. Ainsi, le consommateur chercherait à minimiser sa facture d'énergie, en essayant de substituer des énergies à bas prix aux énergies à prix élevées. Rappelons que la hausse du prix du pétrole se traduit d'une part, par une hausse du prix du carburant, d'autre part, par une hausse du prix d'autres produits tels que le gaz, l'électricité... Or 25% et 15%, soit 40% du budget des ménages français concerne le logement (loyers, chauffage...) et les transports. Les élasticités de la demande au prix et les effets de substitution dépendent de l'existence de produits de substitution, donc de la capacité des entreprises à mettre à la disposition des consommateurs de nouvelles sources d'énergies. De 1995 à 2007, la hausse de prix (60%) s'est traduite pas une augmentation de la consommation (6%). L'entreprise, quant à elle, doit produire et/ou diffuser de l'énergie. Elle applique une méthode coûts - avantages, c'est-à-dire un calcul économique intégrant la notion de risque et de rentabilité. Dans le cas du pétrole, il s'agit de définir le coût de l'investissement (forer un puit de pétrole) et de définir un taux d'extraction (nombre de barils de pétrole). Dans le cas d'une entreprise d'électricité, il convient de définir la capacité des centrales électriques (cette dernière ne pouvant pas être stockée) et de prévoir les possibilités de saturation du réseau.

- Analyse à partir de la logique de marchés (comportements des offres et des demandes, donc des prix). Le marché se réduit à une condition d'existence (jeu de l'offre et de la demande) et une condition d'efficience (si la concurrence est largement préconisée, elle ne se généralise pas à toutes les structures du marché : l'offre de pétrole est aux mains d'un cartel, celui de l'OPEP, qui applique depuis de nombreuses années une politique de quotas de production). D'un point de vue économique, le prix du pétrole se trouve ainsi soumis aux quotas de production décidés par l'OPEP (volonté de maîtriser les prix afin d'éviter un contre choc); aux

---

<sup>4</sup> La part des majors (Shell, BP, Exxon, ENI, Total...) dans la production mondiale atteint aujourd'hui à peine 15% alors que celle des compagnies locales se situe autour de 70%

<sup>5</sup> Aujourd'hui, les capacités de raffinage fonctionnent à pleine capacité et sont inadaptées aux marchés locaux.

niveaux de production de certains pays producteurs hors OPEP (Venezuela) ; à la demande mondiale (très forte du côté de pays tels que la Chine et les USA) ; aux stocks mondiaux (baisse des stocks américains<sup>6</sup>) ; à la valeur du dollar (la dépréciation du dollar - parité \$/€ renforce - a renforcé la politique de prix élevés des pays producteurs) et aux comportements spéculatifs sur les marchés à terme. Les marchés à terme - relatifs à un système complet de marchés, présents et futurs - constituent des outils de couverture, d'arbitrage mais également de spéculation sur les marchés de matières premières. Ceci consiste à prendre sur le marché à terme, une position inverse et identique, à celle que l'on a pris sur le marché au comptant. Ainsi, si je suis acheteur de 20 contrats sur le marché au comptant, je me porterais vendeur de 20 contrats sur le marché à terme. L'interdépendance des marchés (financiers, monétaires, immobiliers, pétroliers) qui renvoie à l'idée d'un équilibre général, permet enfin de comprendre les différents arbitrages et reports des différents agents économiques<sup>7</sup>.

- Analyse dite contractuelle, si les marchés peuvent être analysés comme de vastes nœuds de contrats, les entreprises et les Etats sont également amenés à sceller des relations bilatérales échappant au jeu de l'offre et de la demande, donc au marché. On assiste aujourd'hui à une profusion de ces contrats bilatéraux. Pour les Etats<sup>8</sup>, c'est un moyen de sécuriser ces approvisionnements en énergie (ceci a débouché de la part de certains Etats - dont la France - sur la volonté de ne pas ouvrir leur marché de l'énergie à la concurrence européenne et de favoriser l'idée d'un champion national) ou de prendre une position stratégique dans des pays producteurs de pétrole ou d'énergie (la Chine, gros consommateur de pétrole, a cherché à sécuriser ses approvisionnements en signant des contrats bilatéraux avec certains pays africains<sup>9</sup>). Pour les entreprises, c'est un moyen de créer un vaste réseau énergétique (exemple du réseau européen, susceptible d'orienter les excédents de certains états vers les déficits d'autres états) et d'atteindre une taille critique sur le marché convoité (politique des grands leaders nationaux en Europe). Ces pratiques pourraient bien

---

<sup>6</sup> Selon les statistiques publiées par le département américain de l'énergie, les stocks ont baissé de près de 7.1 millions de barils lors de la première du mois de septembre 2007. Depuis juin, leur niveau a diminué de près de 9%. Signe inquiétant lorsque l'on sait que les raffineurs vont devoir constituer des réserves de fioul de chauffage pour passer sans encombre la période des grands froids.

<sup>7</sup> Certains économistes n'hésitent pas à faire un lien entre la crise immobilière américaine (sub-prime) et la montée des cours du pétrole. La hausse du prix de l'énergie pourrait bien peser sur le pouvoir d'achat des ménages américains, et donc sur la consommation américaine. Les banques fragilisées par la crise immobilière rendent en effet l'accès au crédit à la consommation de plus en plus difficile. Les ménages américains dont le taux d'épargne est proche de 0, ne peuvent même plus compter sur l'effet richesse lié à la hausse des marchés immobiliers et boursiers pour doper leurs dépenses.

<sup>8</sup> En Amérique Latine, Hugo Chavez (président du Venezuela, 1998) a nationalisé la compagnie PDVSA (Petroleos de Venezuela) et réduit les multinationales à se contenter de parts minoritaires dans des entreprises d'économie mixte. Le Venezuela a ainsi développé des coopérations bilatérales qui échappent au marché pétrolier mondial. Dans le cadre de l'initiative Bolivarienne pour les Amériques, le Venezuela livre à Cuba 900 000 barils de pétrole par jour (soit un tiers de ses besoins énergétiques) à un taux préférentiel en contrepartie d'une aide médicale de La Havane (20 000 médecins cubains tiennent des dispensaires dans les bidonvilles et les villages reculés du Venezuela).

<sup>9</sup> La Chine a mis en place une stratégie de prises de participations dans des régions où les conditions d'installation et d'exploitation sont particulièrement difficiles (Delta du Niger, Soudan, Lybie...).



Cette boîte à outils doit cependant tenir compte de plusieurs variables exogènes :

- Les évènements politiques : dans un contexte de tension du marché, il y a peu de marges de manœuvre. Le moindre évènement géopolitique (Iran, Iraq, Nigeria...) suffit pour accentuer la pression à la hausse du prix du pétrole. Le feu vert, vendredi 19 octobre 2007, du parlement turc aux forces armées pour une opération contre les rebelles kurdes dans le Nord de l'Iraq, a suffi pour créer un climat de tension sur le marché du pétrole. A New York, le baril de WTI<sup>10</sup> a atteint les 90,07\$ en séance (la première fois de son histoire).
- Les évènements climatiques (ouragans, tornades, typhons) ont également des impacts non négligeables sur les capacités d'approvisionnement et de raffinage des pays industrialisés, et par conséquent sur les prix de la matière première. Le 13 septembre 2007, l'ouragan Humberto a touché les côtes du Texas et de la Louisiane avec des vents de 135 kilomètres/heure, contraignant les compagnies pétrolières à arrêter trois raffineries de la région. Ces nouvelles ont immédiatement fait grimper le cours du brut américain à 80.20 \$ par baril.
- Les politiques nationales : si l'offre de solutions alternatives au pétrole est étroitement liée aux stratégies industrielles, elle est également largement associée à la volonté politique. Dans le cas du pétrole, l'Etat français intervient de manière très ambiguë : par sa *politique fiscale*, il agit directement sur le prix du carburant (les taxes représentent aujourd'hui 80% du prix du pétrole) et donc sur ses recettes fiscales (en modifiant la TIPP, il peut amortir le choc d'une hausse des carburants et du gazole<sup>11</sup>) ; par ses *incitations financières*, il peut stimuler la mise en place de filières alternatives (bio-carburants, énergie éolienne, énergie solaire...); *par sa volonté de sécuriser sa politique énergétique*, il peut chercher à créer des champions nationaux et à fermer leur capital aux groupes étrangers ; par ses subventions aux professions (exemple des pêcheurs en France), il risque de créer un effet de contagion et de limiter les modifications de comportements vis-à-vis d'un pétrole cher.
- Les lobbys internationaux : le secteur pétrolier draine des milliards de \$, les entreprises pétrolières (Total, Shell...) figurent au top 10 des plus gros chiffres d'affaires mondiaux.

## II. LA HAUSSE DU PRIX DU PETROLE, UNE FATALITE OU UNE CHANCE ?

Il est difficile de répondre de manière tranchée à cette question. La hausse du prix du pétrole semble bien être une fatalité. Même si les fluctuations varient à la fois à la hausse et à la baisse (Aux Etats-Unis, la douceur de l'hiver 2006–2007 a réduit les besoins en chauffage et le baril est passé en dessous des 60 \$), il semble que les périodes où le pétrole était bon marché, ne soient plus d'actualité. La forte croissance de la demande (notamment tirée par l'économie chinoise) et la capacité limitée des raffineurs tendent à tirer les prix vers le haut. Il convient d'ajouter que ce n'est pas la

---

<sup>10</sup> En termes physiques, le WTI n'est qu'un pétrole brut américain négligeable, il ne représente que 200 000 barils sur une production mondiale de 86 millions de barils. Mais en termes boursiers, il constitue l'un des deux contrats pétroliers de référence avec le Brent et s'échange deux fois plus que ce dernier. Le WTI sert donc de référence pour indexer le prix d'autres bruts à travers le monde.

<sup>11</sup> En France, la TIPP atteint 42,58 centimes d'euro par litre de gazole contre 30,11 centimes en Belgique et 30,20 en Espagne.

hausse du prix du pétrole qui pose problème, mais bien les fluctuations erratiques du prix (tant à la hausse qu'à la baisse) qui amènent les compagnies nationales à développer avec prudence leurs capacités de production. Dans le même temps, on ne peut affirmer (comme le font certains politiciens et écologistes) que la hausse du prix du pétrole entraînera une vague verte et un développement des énergies alternatives. En effet, l'expérience a montré qu'une hausse des prix du pétrole avait également tendance à repousser les seuils psychologiques de baisse de la consommation (en ce qui concerne le carburant, le seuil a été en France de 6 F, puis de 8 F, puis de 10 F, 1€, 1.20€, 1.30€... faudra t'il attendre que le prix de 1.60€ soit atteint pour déclencher de réels changements <sup>12</sup>); à générer des conséquences en matière de choix d'investissement (au prix de 98\$, des gisements de pétrole et de gaz<sup>13</sup> non rentables le deviennent) et à remettre en activité de certaines énergies fossiles (exemple du charbon en Allemagne<sup>14</sup>, en Chine, aux Etats-Unis et en France).

Fort de ce constat, il est possible de passer en revue un certain nombre de pistes de réflexion, concernant la question énergétique. Pour l'économiste, ces pistes peuvent traduire une foi réitérée dans les vertus du marché (le capitalisme et l'économie marchande ayant besoin de nouvelles opportunités de croissance) et des effets de substitution; l'apologie d'un nouveau modèle de développement durable, symbolisé par l'écologie industrielle; ou encore l'évocation d'une prise de conscience que l'on pourrait assimiler à la « décroissance » (que nous associerons à l'écologie politique).

### **A. La foi dans le marché et les effets de substitution**

Comme les agents économiques (consommateurs) ne sont pas des êtres très raisonnables (ces derniers ont vite oublié les conclusions du rapport « halte à la croissance » de 1972), on pourrait considérer la hausse du prix pétrole comme un élément favorable à la baisse de la consommation d'énergie fossile et au développement des énergies alternatives. En d'autres termes, la configuration actuelle du marché du pétrole nous obligerait à faire preuve de pragmatisme et à changer nos habitudes.

On trouve un autre exemple de cet optimisme dans la capacité du marché à apporter une réponse aux problèmes environnementaux. Les années 80 ont vu

---

<sup>12</sup> Selon les dernières données du Ministère de l'économie et des finances, le prix moyen du carburant en France était fixé à 1.30 pour le Super sans plomb et 1.14 pour le gaz oil, quel serait le prix psychologique admissible ?

<sup>13</sup> Le prix du gaz suit le prix du pétrole. Une augmentation du prix du pétrole peut donc relancer les projets d'investissement et de forage de gisements gaziers. En septembre 2007, la Norvège a mis en fonction son immense gisement gazier d'Ormen Lange, qui fera du pays le deuxième exportateur mondial de gaz naturel. Via le Langeled, le plus long gazoduc sous-marin du monde (1200 km), le gisement d'Ormen Lange approvisionnera le marché britannique, dont il couvrira 20% des besoins. En 2010, ce gisement pourrait fournir 70 millions de mètres cubes de gaz et 50000 barils de condensats.

<sup>14</sup> RWE, le deuxième électricien allemand a lancé six nouveaux projets de centrales électriques dont trois brûlants au charbon classique et à la lignite (charbon de mauvaise qualité dont l'Allemagne est amplement pourvue). L'un des projets se situe à Endorf, d'une puissance de 1600 MW, il devrait être opérationnel en 2012. Un autre, situé à Hamm, fait l'objet d'une étude d'impact. Enfin, le dernier, près de Eemshaven (Pays-bas), d'une puissance de 1600 MW, devrait voir sa construction début fin 2007. En décembre 2006, les capacités de production par source d'énergie primaire (en MW) du groupe RWE se présentaient de la manière suivante : houille (14), lignite (10.7), nucléaire (6.3), gaz (6.9) et autres (5.5).

l'apparition de marchés de droits à polluer (système de permis d'émission négociables). Les permis négociables offrent aux pollueurs une souplesse accrue pour répartir leurs efforts de lutte contre la pollution entre différentes sources, tout en permettant aux pouvoirs publics de maintenir un plafond fixe d'émissions polluantes. L'augmentation des émissions d'une source doit être compensée par la réduction d'une quantité au moins équivalente d'émissions provenant d'autres sources. Si par exemple, un plafond réglementaire de pollution est fixé pour une zone donnée, une entreprise polluante ne peut s'y installer ou y étendre son activité qu'à condition de ne pas accroître la charge de pollution totale. Il faut donc que l'entreprise achète des droits à polluer ou permis à polluer à d'autres entreprises situées dans la même zone réglementée, celles-ci étant alors tenues de réduire leurs émissions dans des proportions équivalentes (c'est ce que l'on appelle aussi les échanges de droits d'émissions). Cette stratégie a un double objectif : d'une part, mettre en œuvre des solutions peu coûteuses (en encourageant les entreprises, pour lesquelles la réduction des émissions serait très coûteuse, à acheter des droits de polluer à d'autres entreprises pour lesquelles la réduction le serait moins) ; d'autre part, concilier développement économique et protection de l'environnement en permettant à de nouvelles activités de s'implanter dans une zone réglementée sans accroître la quantité totale d'émissions dans cette zone. Dans le cadre des nouvelles réglementations européennes qui s'appliqueront à compter de 2008, RWE, le deuxième électricien allemand a estimé qu'il pourrait devoir acheter près de 70 millions de tonnes de quotas d'émissions par an sur les cinq prochaines années. Ces droits à polluer pouvant lui coûter des milliards d'€ par an, le groupe s'est engagé dans un projet de réduction de ses émissions. En Grande-Bretagne, RWE a construit deux centrales à gaz et cinq fermes éoliennes, ce qui devrait lui permettre de réduire ces émissions de CO<sup>2</sup> par kWh d'un tiers d'ici 2015.

Cette foi dans les mécanismes du marché (au marché, on ne peut rien imposer<sup>15</sup>) renvoie enfin à un précepte bien connu dans la théorie économique « orthodoxe ». Lorsque le prix d'un facteur de production augmente, l'entreprise a tendance à lui substituer un autre facteur de production moins onéreux. Le progrès technique, résidu de la fonction de production, serait une illustration de l'effet de substitution et une source de croissance économique inépuisable (certains présentent l'hydrogène comme une alternative au pétrole, toutefois son utilisation fait encore courir de nombreux risques, il convient de continuer les recherches). Se pose ainsi plusieurs questions, quelles sont les énergies alternatives au pétrole ? Quel est leur degré d'efficacité (rendement) et d'efficience (rendement rapporté au coût) ? Quels seraient les effets externes générés par le développement des marchés d'énergies alternatives ?

### 1. Les énergies renouvelables

Les marchés des énergies renouvelables affichent aujourd'hui des taux de croissance supérieurs<sup>16</sup> à 30% par an. Difficile de recenser tous les projets (éolien, solaire, biomasse...), cependant une étude des Nations Unies (2006) a évalué les investissements à près de 71 milliards de dollars. Les sommes investies dans l'éolien avoisinaient les 15 milliards de dollars (dont près de 1.2 milliard en France). En

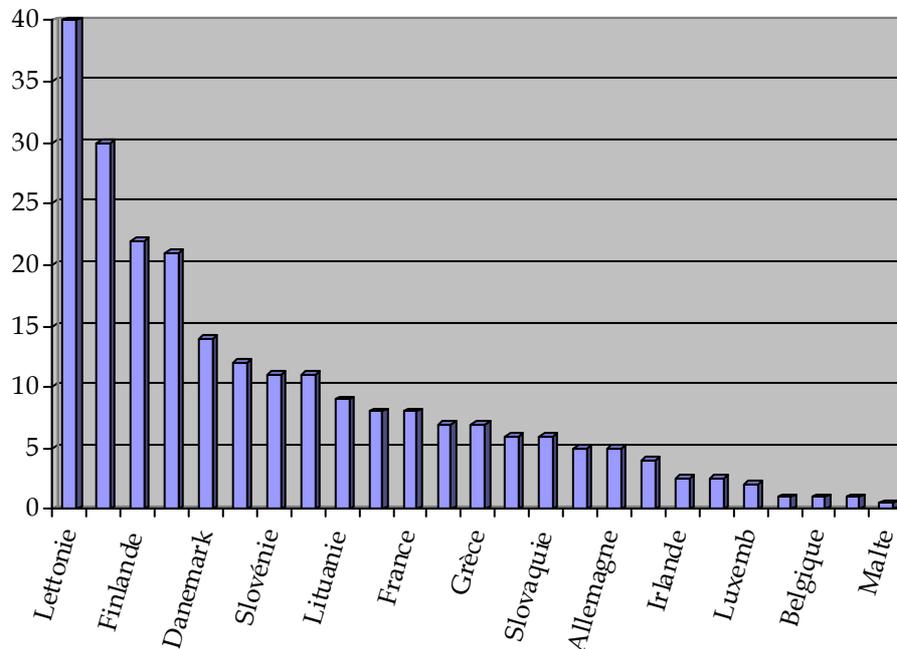
---

<sup>15</sup> En janvier 2007, le prix du brut léger américain était de 50\$, il est aujourd'hui de 96\$.

<sup>16</sup> Le marché mondial du solaire photovoltaïque serait passé de 1780 à 2500 MW (croissance de 40%).

octobre 2007, les autorités bruxelloises ont présenté leur projet de directive cadre sur les énergies renouvelables. L'objectif, affirmé par les chefs d'Etat en mars, est d'avoir 20% d'énergies renouvelables en 2020.

*Fig 3 : Part des énergies renouvelables dans la consommation d'énergie primaire (en%)*



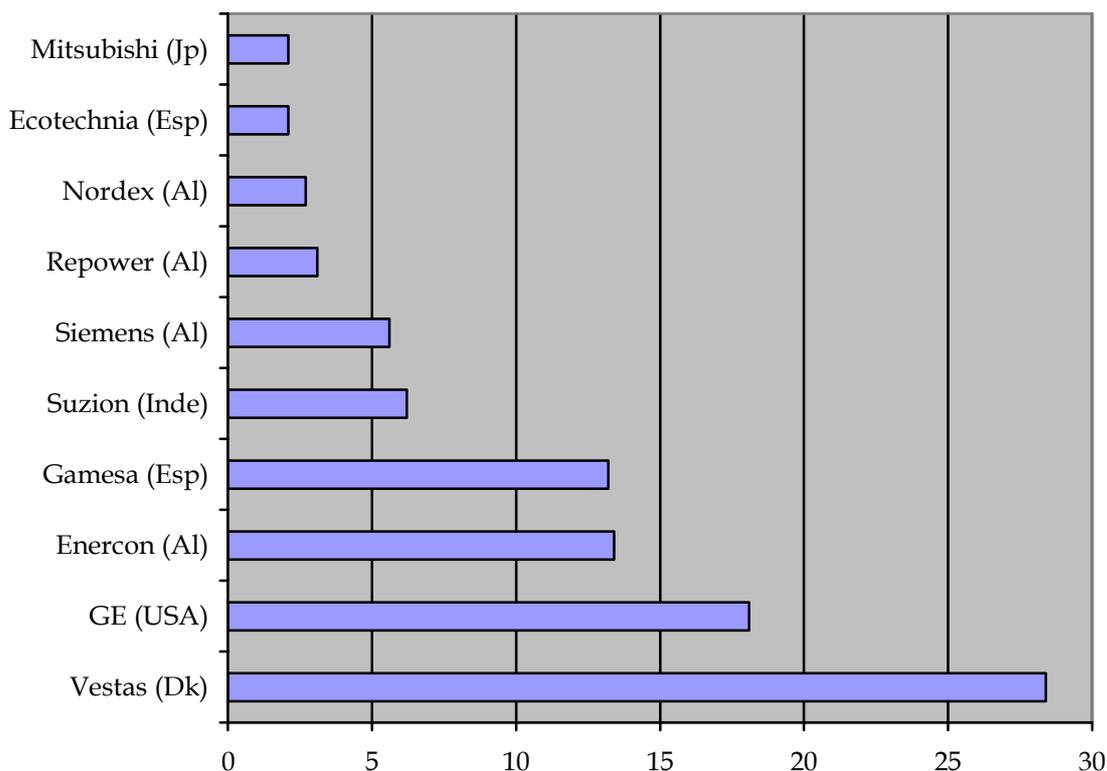
*Source : Commission européenne (2005)*

La commission européenne bute cependant sur un certain nombre de difficultés. La plus importante consiste à répartir les efforts. La situation européenne est en effet très contractée. Si l'Allemagne fait figure de leader mondial dans l'éolien (4 entreprises - Enercon, Siemens, Repower et Nordex - parmi les 10 premières mondiales) et reste bien placée dans le photovoltaïque (90% du parc européen) et les centrales électriques à biomasse, d'autres pays ont pris un certain retard. Alors que la France dispose d'une forêt de 15 millions d'hectares, du deuxième gisement éolien d'Europe<sup>17</sup> et d'un ensoleillement intéressant, elle ne soutient sérieusement les énergies renouvelables que depuis 2005, à la suite de la loi sur l'énergie et l'adoption des tarifs de rachat de l'électricité verte. Malgré des efforts réalisés dans l'éolien (2300 MW installés en 2007 et 6000 MW prévus pour 2010), la France ne compte aucune entreprise<sup>18</sup> dans les 10 premiers constructeurs mondiaux d'éoliennes et de panneaux solaires.

<sup>17</sup> Le développement de l'industrie éolienne française bute sur une contrainte importante. Plus de la moitié des projets (soit 4600 MW) sont bloqués d'une part, par Météo France et les autorités militaires qui craignent des perturbations sur les réseaux radars, d'autre part par les associations d'usagers qui refusent l'implantation des éoliennes sur leurs communes. Aux dires des Echos (24/10/2007), un seul projet éolien mené par la société Enertrag serait en bonne voie. Il s'agirait d'un projet off shore ne nécessitant pas de permis de construire en mer. La profession a réclamé la création d'un comité national de pilotage afin de faire avancer les différents projets.

<sup>18</sup> Areva a acquis récemment l'allemand Multibrud (prototypes d'éoliennes off shores) alors qu'Asthom a dépensé près de 350 millions d'€ pour s'offrir l'espagnol Ecotécnia.

Tableau 1 : Les dix constructeurs mondiaux d'éoliennes (part de marché en %)



*Source* : Le journal des énergies renouvelables

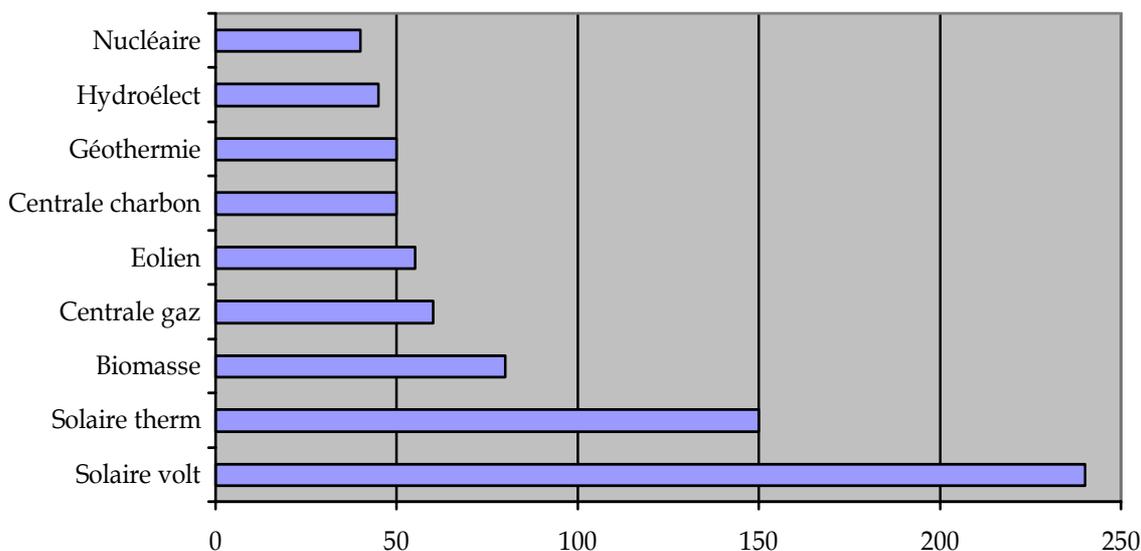
Deux options sont ainsi possibles : 1° déterminer un potentiel<sup>19</sup> de développement de chaque pays, corrigé d'un critère tel que le PIB ; 2° partir d'un chiffre (8.5% de la consommation énergétique finale de l'Union européenne est issue des énergies renouvelables), puis amener chaque état à augmenter sa part<sup>20</sup> dans l'énergie renouvelable pour atteindre l'objectif de 20% (soit une hausse de 11.5 points). Une fois que les objectifs seront fixés, la Commission devra avoir un droit de regard sur les plans qui lui sont présentés. Dans le cas de l'électricité, la *directive de septembre 2001*, qui fixait un objectif global d'électricité d'origine renouvelable de 21% pour 2010, a été renouvelé (les Etats ayant pris un certain retard). Dans le cas de la production de chaleur et de froid (chauffage eau solaire, chaudières au bois, utilisation de gaz de déchets...), l'Union Européenne table sur un doublement de l'utilisation des énergies renouvelables.

Autre difficulté, les coûts de production et les prix des énergies renouvelables restent encore très élevés malgré les progrès technologiques réalisés ces dix dernières années.

<sup>19</sup> La France, qui possède de nombreux sites ventés et d'un bon ensoleillement, aurait ainsi un potentiel inexploité.

<sup>20</sup> Dans le cas de la France, ceci supposerait de passer de 2000 MW d'éolien à 25000 MW (soit l'installation de près de 6000 éoliennes), de construire une filière voltaïque importante et d'intensifier les efforts dans les chaufferies au bois.

*Fig 4 : Coûts de production des énergies renouvelables (€/MW)*



*Source : Les Echos (24/10/2007)*

Les capacités de production ont beau augmenté de 50% par an, la demande est telle que la dégruée des prix des énergies nouvelles est tout de suite enrayerée. En trois ans, le prix des éoliennes a augmenté de 20%. En France, les délais d'approvisionnement vont de 24 à 30 mois. La filière des énergies renouvelables subit également de plein fouet la montée des prix des matières premières. L'industrie photovoltaïque consomme davantage de silicium que l'industrie électronique. Le prix du kilogramme de silicium a été multiplié par 10 durant ces 18 derniers mois. Tant et si bien que le prix du watt installé ne baisse plus depuis trois ans (autour de 8 € par kilowatt installé et raccordé au réseau). Pour de nombreux économistes et industriels, cette surchauffe serait conjoncturelle et devrait s'effacer dès 2010.

Afin de promouvoir les énergies renouvelables et de profiter de certains effets stimulant sur la croissance et l'emploi<sup>21</sup>, les différents états européens ont été amenés à mettre en place différents dispositifs. Le *système du trading* permet à un Etat de remplir son quota national en finançant des projets d'énergie renouvelable dans un autre Etat<sup>22</sup> (c'est le cas de la Belgique qui a financé des projets de panneaux solaires

<sup>21</sup> Souvent présentés comme un moyen de lutte contre les émissions de gaz à effet de serre, les investissements dans les modes de production d'énergie renouvelable ont récemment acquis une autre légitimité : celle de stimuler la croissance économique et de créer des emplois qualifiés et non délocalisables. Selon l'association des professionnels de l'énergie solaire, l'installation de 1 mégawatt de solaire voltaïque (dont la durée de vie est supérieure à 25 ans) permettrait de créer 32 emplois. L'Allemagne, qui a déjà créé 119 000 emplois dans l'industrie éolienne, solaire et de la biomasse en attend près de 500 000 en 2020. De son côté, l'Espagne table sur la création de 200 000 emplois en 2010.

<sup>22</sup> Ce système a cependant l'inconvénient d'attirer les investisseurs vers les marchés les plus rentables et de monter des projets dans les pays émergents (les problèmes de fonciers et de voisinage y sont moins insolubles). Ainsi, les parcs éoliens construits dans des régions en développement, se substituent généralement à des centrales au fioul, très polluantes. Ils génèrent ainsi plus de crédits carbone qu'un projet européen. En investissant dans des pays lointains, les grands opérateurs énergétiques engrangent des certificats de réduction d'émission qu'ils peuvent ensuite convertir en

au Portugal). *Le mécanisme des tarifs d'achat* est un autre moyen permettant de stimuler la production d'énergies renouvelables. Il s'agit de garantir des prix d'achat de l'énergie renouvelable, généralement deux à trois fois plus élevés que le prix courant. Depuis 2004, l'Allemagne a mis en place un prix d'achat garanti<sup>23</sup> afin de soutenir l'éolien. Pendant 25 ans, l'électricité produite par une installation photovoltaïque sera achetée trois fois le prix courant. En 2006, l'Italie a mis en place un système de tarification dégressif (5% chaque année). *Les subventions à la recherche*, destinées à diminuer le coût des technologies, constituent un autre dispositif (utilisé par les Pays-bas).

## 2. Les biocarburants

La hausse du prix du pétrole se traduit généralement par la mise en place de produits substituables. Les biocarburants sont une solution, mais une solution partielle. Le développement massif des biocarburants pose deux problèmes principaux : le problème de la disponibilité des terres agricoles et de la concurrence entre terres agricoles dédiées aux cultures alimentaires et terres agricoles dédiées aux cultures énergétiques<sup>24</sup> ; le problème de leur développement et des conséquences des effets externes à moyen - long terme. Plusieurs exemples peuvent nous servir d'illustrations :

- Le marché du colza est un marché exclusivement européen. Avec une production de 14 Mt de graines pour une trituration européenne qui en transformera 11 Mt, l'Europe des 25 n'a pas besoin d'importer de graines. Même si la parité €/ \$ et les cours du soja donnent la tendance, le marché européen fonctionne avec ses propres prix, et reste soumis à la gestion spatiale des unités de transformation. Les récentes mesures visant à augmenter la production de biocarburants n'a fait que renforcer cette tendance. En renouvelant son intérêt pour les biocarburants, l'Europe a permis au marché européen du colza d'être autosuffisant. L'Allemagne fait figure de pionnière en la matière. Le biodiesel bénéficie d'une détaxation totale. Et les récentes hausses du pétrole n'ont fait qu'encourager le développement des biocarburants. Selon l'UFOP (Organisation de promotion du biodiesel en Allemagne), la production dépasserait les 1.4 Mt. L'Allemagne doit ainsi importer des graines de colza de l'huile - destinées soit au biocarburant, soit au marché de l'alimentaire - pour couvrir ses besoins. Les graines proviennent principalement de la France<sup>25</sup> (1 Mt), de la Pologne (1.49 Mt) et de la République Tchèque (0.9 Mt). L'huile vient quant à elle du marché de Rotterdam, véritable plaque tournante en Europe. Ce marché intéresse de plus en plus les industriels français : l'exemption de taxe sur le biodiesel allemand

---

permis d'émission sur leurs marchés domestiques. Le fonds Carbone créé par EDF et ses filiales (britannique, allemande et italienne) a été doté d'une capacité d'achat de quotas d'émission de 300 millions d'€ pour la période 2008-2012 (près de 40% de cette somme ont déjà été engagés dans des projets éoliens, hydraulique et de biomasse en Chine).

<sup>23</sup> En 2000, l'Allemagne a également confié à une institution financière (Kfw) la mission de stimuler les investissements dans les énergies renouvelables. Kfw distribue ainsi des crédits sur dix ans à taux préférentiel, avec des abattements supplémentaires si les objectifs sont atteints.

<sup>24</sup> Pour pallier en partie ce problème, de nouveaux axes sont privilégiés, comme la production de biocarburant à partir de la biomasse ligno cellulosique (à partir de bois ou de paille de céréales).

<sup>25</sup> L'axe Rhin-Moselle facilite l'approvisionnement des usines situées à l'Est du Pays, et relativement éloignées des principales zones de production.

autorise les industriels à acheter les graines avec une prime par rapport au marché français. Les besoins allemands influencent les principaux cours du colza, le « Fob Moselle », principale référence du marché à terme du colza. Le marché du colza tourne autour des triturateurs. En France, ils sont deux à se partager le marché : Cargill et Bunge/saipol. Sept usines de trituration sont répertoriées : Compiègne, Dieppe, Rouen, Brest, Bordeaux, Lezoux et Sète. A chaque usine correspond une zone d'approvisionnement où les prix évoluent en fonction des besoins de l'usine en graines, des marges de trituration et des cours des produits finis (le tourteau, l'huile). Une tonne de graines produit environ 40 % d'huile et 58% de tourteaux. C'est sur l'huile que le triturateur se fait sa principale marge (rapport de 2.5 à 1). L'huile de Colza s'est profondément installée en Europe suite aux besoins spécifiques pour l'alimentation humaine (regain d'intérêt pour les huiles riches en oméga 3) et pour la carburation. De ce fait, l'exportation d'huile se réduit de plus en plus (avec le diester, le marché français a besoin de 387 000 t d'huile, soit une consommation de 1 Mt de graines). Quant au tourteau de colza, il reprend peu à peu ses parts de marché face au soja (les industriels apprécient de plus en plus la garantie sans OGM, les hausses de volumes triturés se traduisent par une baisse des coûts de production).

- Dans la zone pacifique, l'huile de palme est un bon substitut au pétrole. Cependant sa production se situant principalement sur l'île de Bornéo, la production d'huile de Palme a engendré la destruction de forêts primaires.

- L'Ethanol, obtenu à partir de la betterave, a été présenté en France comme une alternative au pétrole. S'il ne constitue pas une solution intéressante dans la métropole (problème de rendements), il est par contre plus pertinent dans des zones géographiques comme l'île de la Réunion. La production d'éthanol, à partir de la canne à sucre, a fait du Brésil, le premier producteur mondial d'éthanol.

### 3. L'énergie nucléaire

Le nucléaire, principale source d'énergie en France<sup>26</sup>, occupe une position stratégique sur la scène internationale suite à l'ouverture du marché de l'énergie des pays en développement, à la volonté de trouver une source d'énergie à bas prix (50 €/MWh) et au souhait de certains pays de sécuriser ses besoins futurs. L'Inde comme la Chine et la Russie, a défini sa politique énergétique en la recentrant sur des projets de réacteurs nucléaires. La signature d'accords bilatéraux avec la Russie, les USA<sup>27</sup> (août 2007) et prochainement la France, font de l'Inde, l'un des plus grands marchés au monde. Suite à sa croissance à deux chiffres, l'Inde a décidé d'investir massivement dans le nucléaire (2.5% de son électricité) afin de pallier aux pannes de courant répétitives. Le plan officiel « Vision 2020 » vise de porter la capacité du pays de 3800

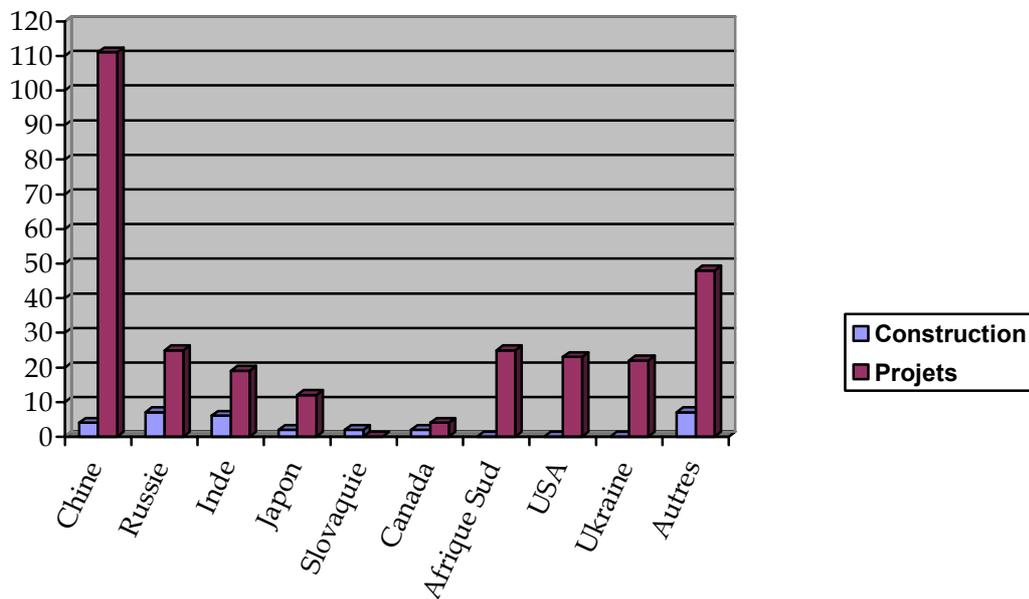
---

<sup>26</sup> L'équilibre offre - demande d'électricité est cependant de moins en moins garanti depuis quelques années. En effet, suite à des problèmes rencontrés sur un certain nombre de centrales nucléaires, EDF a été contraint d'engager des opérations de maintenance sur plusieurs sites. Ceci devrait avoir des répercussions sur la réserve de capacité disponible en janvier 2008 (inférieure de 2000 MW à celle de janvier 2007).

<sup>27</sup> Depuis l'explosion de sa bombe atomique en 1974, l'Inde non signataire du traité de non prolifération des armes nucléaires, ne pouvait acquérir ni technologie à l'étranger, ni uranium. Depuis l'accord « 123 » signé avec les USA dans le nucléaire civil (d'une durée de 40 ans), l'Inde peut faire appel à des technologies américaines sans pour autant renoncer à l'arme atomique, ni adhérer au traité de non prolifération.

MW à 20 000 MW. Aux six réacteurs en chantier, l'Inde prévoit d'en ajouter une vingtaine<sup>28</sup>.

*Fig 5 : Les réacteurs nucléaires en projet dans le monde*



*Source : World Nuclear Association, 2007*

Les marchés des pays de l'Est constituent également une autre source de développement de l'énergie atomique. Longtemps considérée comme une chasse gardée de la Russie, l'intégration de ces pays dans la Communauté européenne a intensifié la concurrence sur les différents marchés nationaux. Ainsi, ce sont près de six candidats (le français EDF, l'italien ENEL, le tchèque CEZ, la filiale belge de Suez, Electrabel, les allemands EON et RWE) qui sont sur les rangs pour reprendre 49% de la société qui fera construire la future centrale nucléaire de Belene<sup>29</sup>.

## **B. Un nouveau modèle de développement durable, l'écologie industrielle**

L'écologie industrielle est une nouvelle approche des relations entre l'industrie et la nature. Elle s'appuie sur l'étude du métabolisme industriel et à donner lieu à de nombreuses expériences telles que la symbiose de Kalundborg et l'émergence des parcs éco-industriels.

- La notion « *d'écologie industrielle* » a été définie en 1989, dans un numéro spécial de la revue « *Scientific American* » (*Pour la Science* en français) consacrée à la « *gestion de la planète Terre* ». Dans un article intitulé « *Des stratégies industrielles viables* », Robert Frosch et Nicolas Gallopoulos, tous deux responsables de la Recherche chez General Motors, développent l'idée selon laquelle il devient nécessaire de recycler les biens usagés, d'économiser les ressources et de rechercher

<sup>28</sup> Quatre réacteurs nucléaires sont en compétition sur la scène internationale : l'AP1000 de Westinghouse (filiale de Toshiba) ; l'ABWR de GE; le VVR 1000 russe et l'EPR du français AREVA.

<sup>29</sup> L'appel d'offres concerne la gestion de deux réacteurs à eau pressurisée de 1000 MW chacun. Le gouvernement bulgare souhaite vendre à un partenaire étranger 49% d'une société spécialement créée pour l'occasion et baptisée « *Belene Power Company* », le reste des parts (51%) étant confié à NEK.

des matières premières de remplacement<sup>30</sup>. L'accumulation des déchets et la pollution générée par le progrès technique les conduisent à remettre en cause le modèle de développement des économies industrielles et à formuler la notion d'écosystème industriel (Diemer, Labrune, 2007). Frosch et Gallopoulos précisent qu'un écosystème industriel pourrait fonctionner comme un écosystème biologique. Les végétaux autotrophes assimilent, par photosynthèse ou chimiosynthèse, des éléments du monde minéral qui se trouvent ainsi intégrés sous une forme réduite dans des molécules organiques ; de l'énergie est investie dans ces composés. Les animaux et les végétaux hétérotrophes sont tributaires des précédents et constituent des chaînes trophiques où, de mangeur en mangé, on assiste à un transfert de matière et d'énergie dans le monde vivant.

- Si l'écologie industrielle cherche à s'approcher le plus possible d'un écosystème « viable » à long terme, il devient nécessaire de cerner quantitativement et qualitativement la dimension physique des activités économiques, à savoir les flux et les stocks de matières inhérents à toute activité industrielle. Cette démarche renvoie à une approche apparue à la fin des années 80 : l'étude du **métabolisme industriel** (Ayres [1989]). L'étude du métabolisme industriel correspond à « *l'étude des ensembles des composants biophysiques du système industriel. Cette démarche, essentiellement analytique et descriptive, vise à comprendre la dynamique des flux et des stocks de matière et d'énergie liées aux activités humaines, depuis l'extraction et la production des ressources jusqu'à leur retour inévitable, tôt ou tard, dans les processus biogéochimiques* » (Erkman [1998], p. 10). En d'autres termes, c'est tout simplement l'ensemble des transformations physico-chimiques qui permettent de passer des matières premières (biomasse, minéraux, métaux, pétrole) aux biens manufacturés et aux déchets. Les économistes parlent de processus de production. La transformation des biens en services introduit cependant un second terme économique, la consommation. De là, le métabolisme industriel comprend tous les flux de matière et d'énergie qui permettent au système économique de fonctionner, c'est-à-dire de produire et de consommer. La méthodologie du métabolisme industriel consiste donc « *à établir des bilans de masse, à estimer les flux et les stocks de matière, à retracer leurs itinéraires et leur dynamique complexes, mais également à préciser leur état physique et chimique* » (Erkman [1998], p. 56). Au sein même des entreprises, cette comptabilisation est réalisée sous la forme d'une matrice input-output (Leontief [1936]) et d'une analyse de cycle de vie. Ces « bilans environnementaux » permettent de contrôler les échanges, de connaître le niveau auquel ils se produisent, de savoir comment ils se structurent et comment ils déstructurent l'environnement (Esquissaud [1990]).

- La « *symbiose de Kalundborg* » illustre la nécessaire interdépendance entre plusieurs processus de production de différentes firmes et le bouclage des flux de matière et d'énergie à mettre en œuvre à l'intérieur d'une zone d'activité industrielle (Vivien [2002]). Elle comprend six partenaires industriels et un acteur public, distants les uns des autres de quelques centaines de mètres seulement, et reliés entre eux par un réseau de pipelines ad hoc (Christensen [2006]).

---

<sup>30</sup> L'écologie industrielle ne se limite pas au secteur automobile. Elle touche toute la communauté des ingénieurs. On peut ainsi citer l'ouvrage de Graedel et Allenby (1995), *Industrial Ecology*. L'un est « membre distingué » du staff technique, l'autre est vice-président de la recherche « *Technology and Environment* » de la société AT & T Bell Laboratories.



qu'à la municipalité de Kalundborg pour son réseau de chauffage urbain à distance. La centrale électrique vend même de l'eau chaude à une ferme d'aquaculture qui élève des turbots.

La symbiose de Kalundborg a permis de tirer trois enseignements. Il s'agit avant tout d'un processus spontané, qui s'est progressivement (de 1961 à 2007) mis en place sur des bases commerciales qui satisfont toutes les entreprises (*scénario win-win*). Suren Erkman note que « *les échanges obéissent aux lois du marché* » [1998], p. 26). Chaque livraison de « déchets » entre les partenaires fait l'objet d'une négociation séparée et confidentielle. La symbiose industrielle de Kalundborg apparaît sous la forme d'un « *réseau environnemental* » de plus de 20 accords commerciaux bilatéraux entre 6 firmes et une municipalité. Trois types de projets ont vu le jour : le recyclage de l'eau (12 projets), l'échange d'énergie (6 projets) et le retraitement des déchets (7 projets). Depuis 1996, le « *Symbiosis Institute* » constitue la mémoire vivante de cette réussite industrielle. Ensuite, le succès du système repose sur une bonne communication<sup>31</sup> entre les partenaires. Christensen ([2006], p. 47-48) met en avant trois facteurs clés : la confiance mutuelle « *Participants must fit, but be different* », la proximité géographique « *There has to be a short physical distance between the participants* », le style de management (partage de certaines valeurs), « *There has to be a short mental distance between the participants* ». Enfin, pour devenir opérationnel, ce système doit être intégré dans l'organisation structurelle des entreprises. Dans le domaine du management, l'écologie industrielle entraîne des conséquences majeures. D'une part, elle remet en cause la focalisation de l'entreprise sur le produit. En effet, il s'agit de donner autant d'importance à la valorisation des déchets. D'autre part, les entreprises doivent établir une sorte de chaîne collaborative pour assurer une gestion optimale des ressources (Esty, Porter, [1998]). Le fait d'optimiser tous les flux de matière et d'énergie mobilisés par les entreprises (de la matière première jusqu'au produit fini) se traduit « *tôt ou tard par une performance et une compétitivité accrue* » (Erkman ([1998], p. 33).

### **C. Une approche plus radicale, la décroissance**

Cette approche renvoie aux travaux de quelques économistes (Nicholas Georgescu-Roegen) et de quelques écologistes (Odum). Elle se situe au carrefour de la vision thermodynamique et biologique du monde. La thermodynamique parce qu'elle nous démontre que les ressources naturelles s'épuisent irrévocablement, la biologie parce qu'elle nous révèle la vraie nature du processus économique

- La thermodynamique nous enseigne que, dans le processus de production, la quantité d'énergie est conservée (premier principe de la thermodynamique), mais sa forme, - et donc sa disponibilité - a changé, de l'énergie libre (ou énergie utilisable) s'est transformée en énergie liée (ou énergie inutilisable), ce que nous appelons le deuxième principe de la thermodynamique, principe dit de Carnot-Clausius, encore appelé loi d'entropie. Pour le dire autrement, le processus économique serait nécessairement entropique, transformant de l'énergie (basse entropie) en déchets et rejets (haute entropie). Georgescu-Roegen (1971) a beaucoup fait pour la reconnaissance de la loi d'entropie. Alors que celle-ci concerne habituellement

---

<sup>31</sup> « *Communication is more important than technology* » (Christensen [2006], p. 48).

l'énergie, Georgescu-Roegen ([1978], p. 361) a étendu cette loi à la matière, en édictant une quatrième loi de la thermodynamique qui stipule que « *dans un système clos, l'entropie de la matière tend continuellement vers un maximum* ».

L'entropie serait donc une loi à laquelle on ne peut échapper, d'où l'insistance de Georgescu-Roegen (1995) sur le caractère irrévocable de cette évolution. Tous les êtres vivants luttent en effet contre l'entropie.

- La biologie souligne que l'homme - comme toutes les espèces naturelles - a toujours utilisé ses organes biologiques afin de puiser la basse entropie de l'environnement. De tels organes propres à chaque espèce vivante sont, selon la terminologie d'Alfred Lotka (1945, 1956), *les organes endosomatiques*. Mais progressivement, les êtres humains se sont distingués de la plupart des animaux en faisant appel à d'autres instruments qualifiés *d'exosomatiques*. Avec ces organes détachables, principalement des outils et des équipements techniques « énergétivores », l'espèce humaine serait parvenue à accomplir de nombreuses réalisations. Les organes exosomatiques seraient même devenus aussi vitaux que les organes endosomatiques (les hommes en sont largement dépendants). Dans ces conditions, le processus économique apparaît bien comme une extension de l'évolution endosomatique, en d'autres termes, comme la continuation de l'évolution biologique (Dannequin, Diemer [1999a]). La référence à la biologie permet également de mettre en lumière le concept de *biocénose*. Ce dernier rappelle que dans les écosystèmes, les différentes espèces d'organismes se rencontrent toujours selon des associations caractéristiques. On peut ainsi étendre ce concept aux systèmes industriels en recherchant les meilleures associations (engrais-ciment ; betterave-biocarburant ; pulpe-papier ; ...)

A ce stade de l'analyse, Nicholas Georgescu-Roegen (1971, 1986) considèrera que la seule voie pour l'humanité consiste à réorienter son développement exosomatique en intégrant les générations futures (Dannequin, Diemer [1999b]). La prise en compte des générations présentes et futures doit se traduire par la mise en place d'un *programme bioéconomique minimal* (NGR [1975], [1978]), symbolisant la montée des valeurs sociétales et de l'éthique (Dannequin, Diemer [2004]). Tous les espoirs sont ainsi contenus dans la fusion de l'économie et de l'écologie (c'est toutefois l'économie qui devra être absorbée par l'écologie) : « *L'un des principaux problèmes écologiques posé à l'humanité est celui des rapports entre la qualité de la vie d'une génération à l'autre et plus particulièrement celui de la répartition de la dot de l'humanité entre toutes les générations. La science économique ne peut même pas songer à traiter ce problème. Son objet, comme cela a souvent été expliqué, est l'administration des ressources rares; mais pour être plus exact, nous devrions ajouter que cette administration ne concerne qu'une seule génération* » (NGR [1979], p. 95). Si la « décroissance » prônée par Georgescu-Roegen (1995) paraît difficile à mettre en œuvre (l'homme reste attaché au confort que lui procure ses organes exosomatiques), le message ne tombera pas dans l'oubli. Frosch et Gallopoulos rappelleront par deux fois qu'un écosystème industriel efficace ne s'établira que « *si les réformes de la production s'accompagnent de modifications des habitudes de consommation et des traitements des produits consommés (exemple du tri des ordures bien présent dans des pays comme le Japon, la Suède et la Suisse)* » ([1989], p. 114). Les industriels et les consommateurs devront changer leurs habitudes s'ils veulent

conserver ou améliorer leur niveau de vie, sans souffrir de la dégradation de l'environnement.

## Bibliographie

- Attali J. (2007), « Premières propositions sur le pouvoir d'achat », *Commission pour la libération de la croissance française*, Rapport intermédiaire, octobre, 34 p.
- Ayres R.U, Ayres L.W (1996) « *Industrial Ecology : Towards Closing the Materials Cycle* » Edward Elgar.
- Ayres R.U, Simonis U.E (1995), *Industrial Metabolism : Restructuring for Sustainable Development*, United Nations Publication, New York.
- Bonenfant R., Kueny L. (2007), « Pétrole : du marché au marchandage », *Problèmes économiques*, n° 2932, 10 octobre, p. 45 – 48.
- Bourg D. (2002), *Le développement durable a-t-il un avenir ?*, Le Pommier.
- Bourg D. (2003), *Le nouvel âge de l'écologie*, Descartes et Cie.
- Bourg D., Erkman S. (2003), *Perspectives on industrial Ecology*, Sheffield, Greenleaf Publishing.
- Bourg D., Rayssac G.L (2006), *Le développement durable*, Gallimard.
- Brown L. (1991) « *Le défi planétaire* » Sang de la Terre.
- Brunel S. (2004), *Le développement durable*, PUF.
- Chalmin P. (2007), *Le poivre et l'or noir*, Editions
- Christensen J. (2006), "The History of the Industrial Symbiosis at Kalundborg, Danemark", *Scientific Workshop 'Frontiers of Research in Industrial Ecology'*, University of Lausanne, November 27 – December 1th, 49 p.
- Dannequin F., Diemer A. (2004), « *Nicholas Georgescu-Roegen : vers la décroissance ?* » texte disponible sur le site <http://www.oeconomia.net>, rubrique *Histoire de la pensée économique*, 4p.
- Dannequin F., Diemer A., Petit R., Vivien F-D (2000), « la nature comme modèle ? Ecologie industrielle et développement durable », *Cahiers du CERAS*, n° 38, mai, p. 62-75.
- Dannequin F., Diemer A. (1999a), « La place de la biologie et de la thermodynamique dans la théorie contemporaine : l'oeuvre scientifique de Nicholas Georgescu-Roegen », Colloque de l'ACGEPE, 26 – 27 septembre, Paris, 8 p.
- Dannequin .F, Diemer .A (1999b), « De l'entropie à la constitution d'un programme bioéconomique : Le grand projet de Nicholas Georgescu-Roegen », *Cahiers du CERAS*, Décembre, n° 42, pp. 1- 9.
- Dannequin .F, Diemer .A, Vivien F.D (1999a) « *Ecologie industrielle et développement durable* » Colloque de Reims, Hermès, 8 p.
- Dannequin .F, Diemer .A, Vivien F.D (1999b) « *Industrielle ou politique ? Quelle écologie pour le développement durable ?* » International Conference on Industrial Ecology and Sustainability, Université technologique de Troyes les 22-25 septembre, 8 p.
- Dannequin F., Diemer A., Vivien F.D (1998) « *Thermodynamique, biologie et économie chez Georgescu-Roegen* » Colloque de Reims, journées Hermès, 7 décembre, 8 p.
- Diemer A., Labrune S. (2007), « L'écologie industrielle : quand l'écosystème industriel devient un vecteur du développement durable », *Revue Développement Durable et Territoires Fragiles*, octobre, p. 1- 23.
- Diemer A. (2005), « Le Développement Durable vu par les économistes », Journées « *Culture, Economie et Développement durable* », IUFM Auvergne, 13 p.
- Erkman S. (1994) « *Ecologie industrielle, métabolisme industriel et société d'utilisation* » Genève, ICAST.
- Erkman S. (1997) « *Industrial Ecology : An Historical View* » *Journal of Cleaner Production*, vol 5, n°1-2, p. 1 – 10.
- Erkman S. (1998) « *Vers une écologie industrielle : comment mettre en pratique le développement durable dans une société hyper-industrielle* » Editions Charles Leopold Mayer, réédition, 2006.
- Erkman S. (2001) « L'écologie industrielle, une stratégie de développement » *Le débat*, n°113, p.106-121.
- Erkman S. (2004), « *L'écologie industrielle, une stratégie de développement* », Exposé, Bruxelles, 9 p.
- Frosch R. (1995) « L'écologie industrielle du XXe siècle », *Pour la science*, 217, p. 148-151.
- Frosch R.A (1992) « *Industrial Ecology : A philosophical Introduction* » *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, vol 89, p. 800 – 803.
- Frosch R.A, Gallopoulos N.E (1992) « *Towards an Industrial Ecology* », p. 269 – 292, in Bradshaw A.D, « *The Treatment and Handling of Wastes* » Chapman and Hall, London.

- Frosch R.A, Gallopoulos N.E (1989) «Strategies for Manufacturing », *Scientific American*, vol 261, Special Issue «Managing Planet Earth », September, p. 144 – 152). Traduction française «Des stratégies industrielles viables », *Pour la Science*, n°145, novembre 1989, p. 106 – 115.
- Georgescu-Roegen N. (1995) «*Demain, la décroissance: entropologie-écologie-économie*», Sang de la Terre.
- Georgescu-Roegen N. (1987) «*Entropy* » in J. Eatwell, M. Milgate, P.K Newman, The New Palgrave, A Dictionary of Economics, vol I, London, Mc Millan Press, (p 153 - 156)
- Georgescu-Roegen N. (1986) "Man and production", in Baranzani M. et Scazzieri R. (eds) "*Foundations of economics*", Basil Blackwell.
- Georgescu-Roegen N. (1979) "Methods in economic science", *Journal of economic issues*, vol XIII, n°2.
- Georgescu-Roegen Nicholas (1978) «De la Science Economique à la Bioéconomie », *Revue d'Economie Politique*, t LXXXVIII, n° 3, Mai-Juin, p. 337 - 382.
- Georgescu-Roegen N. (1978) "Mechanistic dogma and economics", *British review of economic issues*, 2.
- Georgescu-Roegen N. (1977) « What thermodynamics and Biology Can Teach Economists », *Atlantic Journal Economic*, vol 5, p. 13 – 21.
- Georgescu-Roegen (1977 a) «What Thermodynamics and Biology Can Teach Economists », *Bio-Science* vol XXVII, avril, p. 266 - 270.
- Georgescu-Roegen .N (1977 b) «Inequality, Limits and Growth from a Bioeconomics Viewpoint » *Review of Social Economy*, vol XXXV, p. 361 - 375.
- Georgescu-Roegen N. (1976), *Energy and Economic Myths*, New York, Pergamon Press.
- Georgescu-Roegen N. (1975) « *Bio-Economic Aspects of Entropy* » dans «Entropy and Information in Science and Philosophy » J. Zeman, Amsterdam Elsevier.
- Georgescu-Roegen N. (1971) «*The Entropy Law and the Economic Process* » Cambridge , Harvard University Press.(4ème édition 1981).
- Les Echos (2007), "*Energies renouvelables*", Mercredi 24 octobre, p. 31-33.
- Lotka A . (1956), *Elements of Mathematical Biology*, New York Dover.
- Lotka A. (1945), «The Law of Evolution as a Maximal Principle » *Human Biology*, vol 17, p. 67 - 194.
- Odum E.P. (1971) *Fundamentals of Ecology*, Philadelphia, W.B. Saunders Company, 3rd ed.
- Odum E.P (1983), *Basic Ecology*, Saunders College Publishing, Philadelphia.
- Vivien F. D. (1994) "*Economie et écologie*", La découverte
- Vivien F.-D. (2000) « Industrielle ou politique ? Quelle écologie pour le développement durable ? » in Bourg D., Erkman S. (eds) *Industrial Ecology and Sustainability : Proceedings*, Troyes/ICAST.
- Vivien F.D (2002), « Rencontre du troisième type... d'écosystème ou quand l'écologie devient industrielle », *Colloque de Dunkerque*, 8 p.
- Vivien F.D (2005), *Le développement soutenable*, La Découverte.
- Vivien F.D (2006), "*L'écologie industrielle : une critique du point de vue de l'économie politique*", *Scientific Workshop 'Frontiers of Research in Industrial Ecology'*, University of Lausanne, November 27 – December 1th, 22 p.