

# ANNALES DES MINES

FONDÉES EN 1794

## RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

Publiées avec le soutien du ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi.  
Le contenu des articles n'engage que la seule responsabilité de leurs auteurs.

ISSN : 1268-4783  
Série trimestrielle • n° 58 - avril 2010

### Rédaction

Conseil général de l'Industrie, de l'Énergie et des Technologies, Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi (MEIE)  
120, rue de Bercy - Télédock 797, 75572 Paris Cedex 12  
Tél : 01 53 18 52 68  
<http://www.annales.org>

### Pierre Couveinhes

Rédacteur en chef des *Annales des Mines*  
Avec le concours de **Bruno Sauvalle**, ingénieur en chef des Mines

### Gérard Comby

Secrétaire général de la série « Responsabilité & Environnement »

### Martine Huet

Assistante de la rédaction

### Marcel Charbonnier

Lecteur

### Membres du Comité d'orientation

#### Philippe Saint Raymond

Président du comité d'orientation,  
Responsable éditorial  
Ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi, Conseil général de l'industrie, de l'énergie et des technologies

#### Dominique Bernard

Afite, Président d'honneur

#### Paul-Henri Bourrelrier

Ingénieur général des Mines, Association française pour la prévention des catastrophes naturelles

#### Jacques Brégeon

Collège des hautes études de l'environnement et du développement durable, ECP, INA P-G, SCP-EAP

#### Christian Brodhag

Ecole nationale supérieure des Mines de Saint-Etienne

#### Xavier Cuny

Professeur honoraire Cnam, Conseil supérieur de la prévention des risques professionnels

#### William Dab

Cnam, Professeur

#### Daniel Fixari

Ecole des Mines de Paris, Centre de gestion scientifique

#### Odile Gauthier

Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer, Direction de l'eau et de la biodiversité

#### Christian Huglo

Avocat

#### Vincent Jacques le Seigneur

Secrétaire général de l'INES, Maître de conférences à Sciences-Pô, Paris

#### Vincent Lafèche

Ineris, Directeur général

#### Jean-Luc Laurent

Laboratoire national de métrologie et d'essais, Directeur général

#### Yves Le Bars

Cemagref

#### Patrick Legrand

Inra, Vice-Président de la Commission nationale du débat public

#### Benoît Lesaffre

CIRAD

#### Geneviève Massard-Guilbaud

Ecole des Hautes études en sciences sociales, Directrice d'Études

### Laurent Mermet

Engref

### Alain Morcheoine

Ademe, Directeur de l'air, du bruit et de l'efficacité énergétique

### Pierre Frédéric Tenière-Buchot

Consultant environnement, Conseiller spécial au programme des Nations-Unies pour l'Environnement (PNUE)

### Gilbert Troly

Administrateur de la chambre syndicale des industries minières

### Eric Vindimian

CEMAGREF

### Membres du Comité de Rédaction

#### Philippe Saint Raymond

Président du Comité de rédaction,  
Ingénieur général des Mines honoraire

#### Pierre Amouyel

Ingénieur général des Mines honoraire

#### Paul-Henri Bourrelrier

Ingénieur général des Mines honoraire, Association française pour la prévention des catastrophes naturelles

#### Fabrice Dambrine

Haut fonctionnaire au développement durable, MEIE

#### Pascal Dupuis

Chef du service du climat et de l'efficacité énergétique, Direction générale de l'énergie et du climat, MEEDDM

#### Jérôme Goellner

Chef du service des risques technologiques, Direction générale de la prévention des risques, MEEDDM

#### Rémi Guillet

Ingénieur général des Mines, CGIET, MEIE

#### Jean-Luc Laurent

Directeur général du Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE)

#### Richard Lavergne

Chargé de mission stratégique Énergie-Climat au Commissariat général au développement durable, MEEDDM

#### Bruno Sauvalle

Ingénieur en chef des Mines, CGIET, MEIE

#### Gilbert Troly

Administrateur de la Chambre syndicale des Industries minières

### Table des annonceurs

✓ Annales des Mines : 2°, 3° – 4° de couverture et page 4.

### Photo de couverture

✓ Gisement de fer du mont Newman, Australie occidentale.  
Photo © Regis Martin/THE NEW YORK TIMES/REA

### Abonnements et ventes <http://www.eska.fr>

Editions ESKA

12, rue du Quatre-Septembre, 75002 Paris

Serge Kebabtschieff : Directeur de la publication

Tél. : 01 42 86 55 73 - Fax : 01 42 60 45 35

Tarifs : voir bulletin encart vert (*pages 105 et 106*)

### Conception

Hervé Lauriot-Prévost

### Iconographie

Christine de Coninck

### Publicité

J.-C. Michalon - ECC

2, rue Pierre de Ronsard 78200 Mantes-la-Jolie

Tél. : 01 30 33 93 57 - Fax : 01 30 33 93 58

Vente au numéro par correspondance et disponible dans les

librairies suivantes : Guillaume - ROUEN ; Petit - LIMOGES ;

Marque-page - LE CREUSOT ; Privat, Rive-gauche -

PERPIGNAN ; Transparence Ginestet - ALBI ; Forum - RENNES ;

Mollat, Italique - BORDEAUX.

# RESPONSABILITÉ

## SOMMAIRE

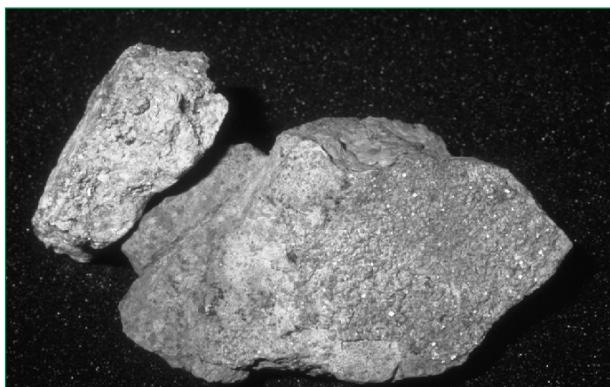
### LES MATIÈRES PREMIÈRES

**5** ÉDITORIAL  
*BRUNO SAUVALLE*

#### Général

**7**  
Équité et efficacité dans l'usage des ressources naturelles  
*Pierre-Noël GIRAUD*

**11**  
Seule certitude pour 2010 : l'instabilité  
*Philippe CHALMIN*



© Source AREVA



© Jiri Reza/REA

### Énergie

**13**  
Les perspectives de l'offre mondiale de pétrole  
*Bruno WEYMULLER*

**19**  
Les évolutions du prix du pétrole  
*Denis BABUSIAUX et Axel PIERRU*

**27**  
Le gaz naturel : une énergie d'avenir  
*Jean-Marie DAUGER*

**34**  
La nouvelle géopolitique charbonnière  
*Sylvie CORNOT-GANDOLPHE*

**41**  
Les matières premières nucléaires  
*Bernard BIGOT*

**51**  
Biocarburants : quel potentiel de développement ?  
*Nathalie ALAZARD-TOUX*

# & ENVIRONNEMENT

Avril 2010 ◆ Numéro 58



© Claudius Thiriet/BIOSPOTO

## Agriculture

**58**

Comment nourrir neuf milliards de personnes sans détruire l'environnement ?

*Michel GRIFFON*

**62**

Donner la priorité à une approche économique du développement de l'agriculture africaine

*Bernard BACHELIER*

## Métaux

**67**

La gestion stratégique des ressources minérales par les Etats et les compagnies minières : vers un développement des oligopoles ?

*Patrice CHRISTMANN et Bruno MARTEL-JANTIN*

**75**

L'initiative européenne sur les matières premières

*Abraão de CARVALHO*

**79**

Les ressources minérales : un atout pour le développement de l'Afrique subsaharienne ?

*Paulo de SA et Gary McMAHON*

**84**

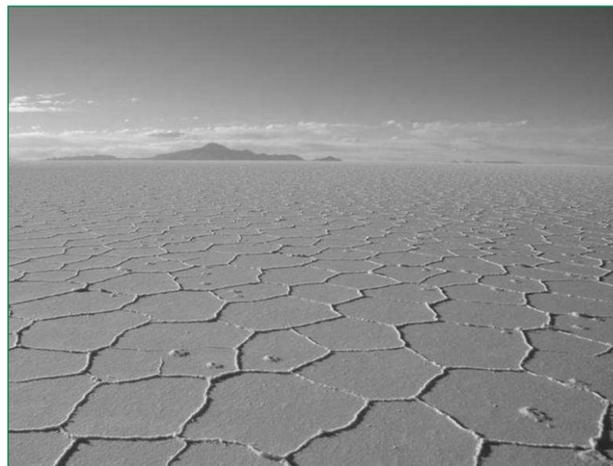
Le lithium : un métal stratégique

*Antoine GOUZE*

**92**

Les terres rares, des matières premières minérales stratégiques

*Jean-Pierre CLAMADIEU et Emmanuel BUTSTRAEN*



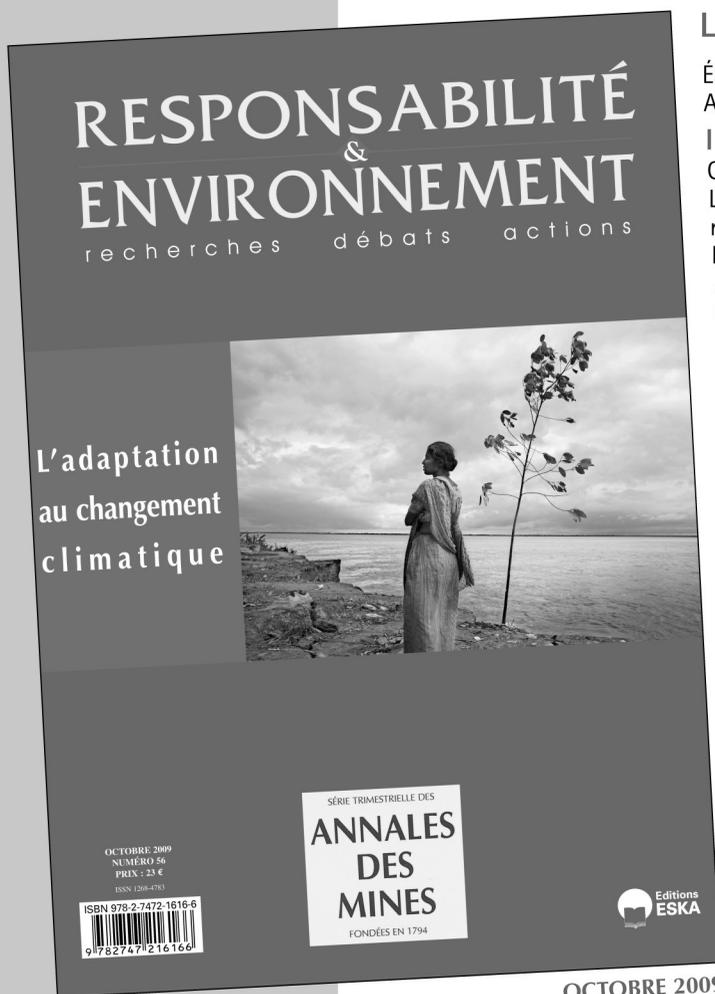
© Source ERAMET

\*\*\*\*\*

Dossier coordonné par  
*Pierre-Noël GIRAUD et Pierre COUVEINHES*

# RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

recherches débats actions



OCTOBRE 2009  
ISSN 1268-4783  
ISBN 978-2-7472-1616-6

## L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

ÉDITORIAL, *Pierre COUVEINHES*

AVANT-PROPOS, *Paul-Henri BOURRELIER*

### I - L'adaptation

Considérations sur le climat, *Emmanuel Le ROY LADURIE*

Les représentations du changement climatique : de la création divine à la responsabilité de l'homme, *René FAVIER*

Les leçons de l'histoire géologique et des grandes extinctions d'espèces, *Patrick De WEVER*

Climat, adaptation, évolution et biodiversité, *Gilles ESCARGUEL*

Les territoires face au changement climatique, *Martine TABEAUD*

Des événements naturels extrêmes aux figures de la catastrophe, *Paul-Henri BOURRELIER et Jean DUNGLAS*

Adapter qui à quoi ? Quelle place pour l'homme dans la nature ?, *Michel JUFFÉ*

*Michel JUFFÉ*

### II - Politiques publiques et actions de tous

La place de l'adaptation dans la politique climatique, *Marc GILLET*

La politique de la France en matière d'adaptation au changement climatique, *Pascal DUPUIS*

Cultivons notre planète : plus de biomasse, moins de gaz à effet de serre, *François PAPPY*

Penser et aménager les agglomérations urbaines : quelques exemples de métropoles européennes, *Brigitte MAZIÈRE*

Pour une gestion dynamique du littoral, *Nicole LENÔTRE*

La couverture financière des événements climatiques extrêmes, *Erwann MICHEL-KERJAN*

L'éthique, fil conducteur de l'adaptation, *Entretien de Paul-Henri*

*BOURRELIER avec Alain GRIMFELD, Yves Le BARS et Claudine SCHMIDT-LAINÉ*

\*\*\*\*\*

*In memoriam : François ASCHER  
(par Mme Marie-Josèphe CARRIEU-COSTA)*

## ÉNERGIE : FAITS ET CHIFFRES EN 2008

Le bilan énergétique de la France pour 2008, *Bernard NANOT*

La facture énergétique de la France en 2008, *Bernard NANOT*

L'électricité en 2008, *Sylvie SCHERRER*

Le gaz naturel en France : les principaux résultats en 2008, *Véronique PAQUEL*

*Véronique PAQUEL*

Les combustibles minéraux solides, *Sami LOUATI*

Les hydrocarbures, *Maurice GIRAULT*

Les énergies renouvelables en France : les principaux résultats en 2008, *Hélène THIÉNARD*

*Hélène THIÉNARD*

## BULLETIN DE COMMANDE

A retourner aux Éditions ESKA, 12, rue du Quatre-Septembre, 75002 PARIS

Tél. : 01 42 86 55 73 - Fax : 01 42 60 45 35 - <http://www.eska.fr>

Je désire recevoir ..... exemplaire(s) du numéro de **Responsabilité & Environnement octobre 2009 - numéro 56** (ISBN 978-2-7472-1616-6) au prix unitaire de 23 € TTC.

Je joins  un chèque bancaire à l'ordre des Éditions ESKA

un virement postal aux Éditions ESKA CCP PARIS 1667-494-Z

Nom ..... Prénom .....

Adresse .....

Code postal ..... Ville .....

## Éditorial

*La crise économique actuelle amène naturellement de nombreux observateurs à réexaminer d'un œil critique les apports des sciences économiques à la compréhension du fonctionnement de notre économie. Le secteur des matières premières est tout particulièrement approprié pour ce type de réexamen : les statistiques sont abondantes, les marchés à étudier se définissent de manière relativement simple et les prix sont, pour une grande part, publics.*

*Une des principales règles qui fondent l'efficacité de l'économie de marché est qu'en laissant producteurs et consommateurs négocier librement le prix d'échange d'un produit, un équilibre se formera entre l'offre et la demande et que le prix de marché correspondant permettra une optimisation globale de l'allocation des moyens de production.*

*Cependant, depuis 2008, l'évolution des prix des matières premières pose question : les prix de matières premières énergétiques ou industrielles (tout comme ceux des produits agricoles) se sont ainsi mis à croître dans des proportions inédites au premier semestre 2008, avant de s'effondrer, de façon brutale, à l'automne. Confiants dans l'efficacité des mécanismes de marché dans la fixation des prix, de nombreux observateurs attribuaient (au premier semestre) la hausse des marchés au fait que nous nous trouverions désormais dans un contexte durable de pénurie : le « pic pétrolier » approcherait, les terres agricoles ne suffiraient plus à satisfaire les besoins alimentaires et la production de biocarburants, les importations de matières premières industrielles en provenance de la Chine, entraîneraient, à terme, une saturation des capacités d'extraction...*

*La crise qui a suivi a cependant vu le prix du pétrole divisé par quatre et l'ensemble des prix des matières premières revenir à leur niveau de 2007, alors même que les mécanismes potentiellement haussiers à moyen terme que nous avons décrits plus haut n'étaient pas réellement remis en cause. Les partisans les plus orthodoxes de la théorie des marchés efficients affirmeront que la hausse des prix, au premier semestre 2008, tout comme leur effondrement, à l'automne, sont simplement le reflet d'un changement dans les anticipations des acteurs et qu'ils restent donc cohérents avec une certaine optimalité économique...*

*Cependant, si le caractère cyclique et la volatilité de ces secteurs sont connus depuis longtemps, il apparaît désormais de plus en plus vraisemblable que les fluctuations des prix des marchés mondiaux peuvent être temporairement déconnectées de l'équilibre – réel ou anticipé – entre l'offre et la demande, les matières premières étant devenues le support de produits financiers soumis à la spéculation et aux « esprits animaux » chers à Keynes. Par ailleurs, il est frappant de constater que, plus d'un an après ces événements, les causes de ces variations (notamment celles de la hausse enregistrée au premier semestre 2008) n'ont toujours pas été élucidées de façon certaine, ce qui signifie qu'en réalité, on ne connaît pas les mécanismes réels du fonctionnement de ces marchés.*

*Il est difficile, dans une telle situation, de continuer à affirmer avec quelque certitude que les prix du marché constitueraient naturellement un optimum économique.*

*Une deuxième règle, jusqu'à présent considérée acquise par de nombreux acteurs publics, notamment au niveau international, est que, le développement de la concurrence étant un moteur essentiel de la performance économique, l'intervention des pouvoirs publics sur les marchés doit essentiellement se limiter à veiller à ce que ceux-ci fonctionnent de manière concurrentielle et ce, dans le cadre le plus large possible – c'est-à-dire au niveau mondial –, tout en luttant contre la formation de monopoles (ou d'oligopoles) privés. Cependant, si l'on observe la façon dont les marchés de matières premières fonctionnent, une telle conception*

*des choses paraît insuffisante, nombre de secteurs étant confrontés à l'existence d'oligopoles d'Etat. Cette configuration est bien connue en ce qui concerne les matières premières énergétiques, mais la liste des autres matières premières pour lesquelles cette question se pose, ne cesse de s'allonger, comme le montrent les cas du lithium ou des terres rares, dont traite ce numéro des Annales des Mines.*

*Manifestement, la définition d'une doctrine européenne en matière d'intervention des pouvoirs publics dans la gestion de ces filières continuera à faire couler beaucoup d'encre...*

*Bruno SAUVALLE*

## Équité et efficacité dans l'usage des ressources naturelles

**Avons-nous le droit d'épuiser rapidement les réserves de pétrole conventionnel à moins de 20 dollars le baril, ou devons-nous en laisser aux générations futures ? Dans quelle mesure devons-nous préserver les sols et les forêts primaires ? Quelle est l'ampleur des efforts d'atténuation du changement climatique que nous devrions engager dès maintenant ? Un préalable est nécessaire à toute analyse économique de ces questions : le choix de normes d'équité inter et intragénérationnelles – un choix qui ne saurait résulter que d'un processus politique.**

par Pierre-Noël GIRAUD\*

L'on s'inquiète, aujourd'hui, de ce que notre mode d'exploitation des ressources naturelles, dont les capacités d'absorption des déchets humains par les écosystèmes font partie, serait très inéquitable et ne se soucierait pas suffisamment des générations à venir. Sur ce dernier point, l'inquiétude engendre parfois une attitude de sacralisation de la nature : les prophéties catastrophiques aux accents millénaristes se multiplient et, alors même que plus de la moitié des hommes vit encore dans une dégradante pauvreté, des Cassandre nous enjoignent de nous engager sans délai dans le chemin de la « décroissance » et de retourner au plus vite à un mode de vie biblique, si nous voulons éviter que l'humanité ait à affronter un déluge environnemental d'une telle violence qu'aucun Noé n'y survivrait.

Cet article propose une présentation succincte et non technique de ce que serait, du point de vue de la science économique, une exploitation à la fois efficace et « équitable » des ressources naturelles. On commencera par distinguer classiquement deux types de ressources naturelles : les ressources épuisables et les ressources renouvelables, qui présentent des caractéristiques et donc des problématiques bien différentes. On soulignera ensuite qu'il y a un préalable à toute analyse économique de ces questions : le choix de normes d'équité inter et intragénérationnelles – un choix qui ne saurait résulter que d'un processus politique. On rappellera ensuite quelles sont les prescriptions de l'économie quant à l'exploitation des ressources naturelles, une fois fixées ces normes d'équité.

### Deux types de ressources naturelles

Le travail et la « terre » sont les sources de toute richesse, comme l'affirmèrent dès l'origine de la pensée économique les grands auteurs classiques (Smith, Ricardo, Marx) en distinguant trois facteurs de production : le travail, la terre et le capital (celui-ci n'étant rien d'autre que du tra-

vail « cristallisé »). Dans le vocabulaire de l'économie contemporaine, on parle de « capital naturel » pour désigner ce facteur indispensable qui contribue, en association avec le capital humain, social et technique (1), à la production de l'ensemble des richesses. Au sein du capital naturel, il faut distinguer les ressources renouvelables des ressources épuisables.

Les ressources épuisables sont extraites, pour l'essentiel, du sous-sol : minerais solides, pétrole et gaz, nappes d'eau fossile. A l'échelle des temps géologiques, certes, elles sont renouvelables. Mais, pour notre génération et pour les générations à venir, elles apparaissent comme un stock fini, que l'exploitation que nous en faisons épuise. Cependant, la notion de « réserve », qui mesure l'importance du stock restant à notre disposition à un moment donné, est une notion économique, et non pas physique. Il s'agit du stock, premièrement, découvert par une activité économique (la recherche de gisements par les firmes minière et pétrolière) et, deuxièmement, exploitable pour un coût inférieur à une limite donnée. Les réserves d'une substance donnée ne sont donc pas quantifiées par un simple chiffre, mais par une courbe de réserves en fonction du coût d'extraction (2). Une matière première extraite du sous-sol remplit dans le processus productif une ou plusieurs fonctions, qu'elle n'est généralement pas la seule à pouvoir remplir. Autrement dit, elle est généralement substituable. Ainsi, le pétrole est substituable par d'autres ressources épuisables, telles que le gaz et le charbon, mais aussi par de la biomasse, qui est une ressource renouvelable. On sait, en effet, depuis des décennies, fabriquer des carburants liquides avec du gaz, du charbon et de la biomasse. Ultiment, le pétrole (dans sa fonction énergétique) est substituable par de l'énergie solaire directe, une ressource renouvelable dont l'abondance dépasse très largement tous les besoins humains imaginables (3). Une dernière caractéristique, importante, des ressources épuisables est le fait qu'un grand nombre des

matières utiles qu'on en extrait, sont recyclables et d'ailleurs recyclées. Ainsi, une hausse du prix des minerais augmente l'intérêt économique du recyclage, et donc le taux de recyclage effectif, ce qui allège d'autant la pression sur les gisements.

Les ressources dites renouvelables soit fournissent à l'activité humaine des flux utiles de matières minérales, de matières organiques et d'énergie, soit absorbent et recyclent des flux de déchets issus de l'activité humaine. A toute ressource renouvelable est associé un « prélèvement ou un rejet maximum soutenable ». C'est le flux maximum que l'activité humaine peut détourner du (ou injecter dans le) cycle naturel sans en mettre en danger la pérennité. Un prélèvement (ou un rejet) supérieur à ce maximum dégrade les écosystèmes et peut même provoquer leur effondrement, tarissant ainsi les services qu'ils rendent, dans certains cas de manière irréversible. Les exemples de dégradations dues à des prélèvements excessifs sont légion : déforestation, épuisement des ressources halieutiques, dégradation ou destruction de la fertilité des sols... Les émissions actuelles de gaz à effet de serre sont un exemple préoccupant de rejet excessif.

Les ressources renouvelables se caractérisent donc par des évolutions non-linéaires et par des phénomènes de seuils et d'effondrements. Elles se caractérisent aussi par l'omniprésence « d'externalités » dues, en général, à la multiplicité des flux qu'engendre une même ressource ou dont elle bénéficie. Ainsi, une forêt ne produit pas seulement du bois ; elle protège une certaine biodiversité, elle entretient le cycle de l'eau, elle influence le climat local. Si on n'exploite une forêt que pour son bois, et si on la rase à cette fin, on crée ainsi des dommages (en termes techniques, des « externalités négatives ») qui peuvent être bien supérieurs au bien-être procuré par le bois.

Enfin, de nos jours, une partie des hommes considère que certaines ressources renouvelables (des paysages et des espèces, par exemple) ont une « valeur d'existence ». En termes économiques, cela signifie qu'ils sont prêts à se priver d'autre chose pour qu'elles soient conservées, même si elles ne fournissent d'autre service que la satisfaction engendrée par leur existence même (4).

### La nécessité de définir des normes d'équité en amont de tout calcul économique

Avons-nous le droit d'épuiser rapidement les réserves de pétrole conventionnel à moins de 20 dollars le baril, ou devons-nous en laisser aux générations futures ? Dans quelle mesure devons-nous préserver les sols et les forêts primaires ? Quelle est l'ampleur des efforts d'atténuation du changement climatique que nous devrions engager dès maintenant ? Une réponse purement économique à ce genre de questions exigerait de comparer des coûts et des bénéfices, et donc d'utiliser un taux d'actualisation, sur de très longues périodes (de l'ordre, par exemple, du siècle).

Or, la définition d'un tel taux d'actualisation, de l'intérieur de l'économie, se heurte non seulement à des difficultés pratiques, mais aussi à des difficultés théoriques insurmontables. Il faudrait d'abord prévoir, sur de très longues

périodes, l'évolution non seulement du progrès technique, mais aussi des préférences des générations futures et, en particulier, le prix relatif qu'elles accorderont aux éléments du capital naturel que nous envisageons de préserver à leur intention. Mais cela ne suffirait pas : il faudrait aussi définir un taux de « préférence pure pour le présent », c'est-à-dire une norme d'équité intergénérationnelle. Quelle valeur relative voulons-nous donner au bien-être des générations futures, par rapport au nôtre ? Zéro : « Après nous, le déluge » ? Un : « Ce sont nos frères, traitons-les exactement comme nous-mêmes » ? Ou alors : une valeur intermédiaire ? Il est clair que ce choix n'est pas de nature économique, mais qu'il doit résulter d'un processus, politique, de définition d'une préférence collective.

Il en va de même des normes d'équité à l'intérieur de la génération présente. Comment, par exemple, répartir entre les riches et les pauvres d'aujourd'hui les coûts d'une politique qui conduirait à ne pas dépasser une augmentation moyenne de la température du globe de 2° C à la fin du siècle, comme nous y invite le GIEC et comme l'ont accepté, en principe, les Etats membres de l'ONU à la COP-15 de Copenhague ? Répondre à cette question semble pourtant plus facile. Il suffit d'affirmer que, tous les hommes naissant égaux en droit, ils doivent avoir un accès égal au capital naturel de la planète. Or, c'est évidemment aujourd'hui loin d'être le cas. Par conséquent, même si cette norme faisait consensus, ce ne serait qu'en tant que but à atteindre. Elle ne dirait rien ni du rythme d'une transition de l'immense inégalité actuelle à cette égalité de principe, ni de la manière de prendre en compte les émissions passées – celles de l'époque où « on ne savait pas ».

Une fois les normes choisies, le calcul économique devient possible. Sous réserve, toutefois, de la très forte incertitude pesant sur la connaissance des évolutions du progrès technique et des préférences formulée ci-dessus.

### Quelles normes d'équité choisir ?

Or, on peut légitimement soutenir que l'incertitude sur le rythme du progrès technique et les préférences des générations futures devient « radicale » (c'est-à-dire non probabilisable) au-delà d'un horizon de 30 à 40 ans. Dans ces conditions, tout calcul économique est disqualifié au-delà de cet horizon, c'est-à-dire, en pratique, au-delà de la génération succédant immédiatement à la nôtre. Pour le plus long terme, on ne peut, par conséquent, que formuler des conjectures et faire des paris. On peut ainsi parier qu'un rythme soutenu de « progrès » (scientifique, technique, organisationnel et humain) permettra aux générations à venir de traiter les conséquences de nos propres dégradations du capital naturel bien plus facilement que nous ne le ferions nous-mêmes. On aurait alors le droit de consommer beaucoup de capital naturel, mais à condition d'accumuler et de transférer d'autres formes de capitaux qui permettraient aux générations futures de s'adapter sans grandes difficultés. Les défenseurs de cette position affirment, plus ou moins implicitement, deux choses. Premièrement, qu'il existe toujours une possibilité de compenser une destruc-

tion de capital naturel par la transmission d'un capital humain et social suffisamment élevé. Deuxièmement, que, si d'aventure les générations futures se prenaient de passion pour un élément du capital naturel que nous aurions dégradé, elles y trouveraient plus aisément un substitut, ou elles le répareraient plus facilement que nous si nous avions dû nous passer de le dégrader. En bref, ils affirment que le capital naturel, d'une part, et les autres capitaux, d'autre part, 1) sont « facilement substituables » et 2) qu'ils le seront de plus en plus facilement, grâce au « progrès ».

Ces convictions combinées avec un souci réel des générations à venir (c'est-à-dire une norme d'équité intergénérationnelle non nulle) se traduisent en norme de la manière suivante : « Exploisons à notre guise le capital naturel, à condition d'investir suffisamment dans le capital humain et social. En présence de grandes incertitudes, c'est toujours ce qu'il y a de mieux à faire pour les générations futures ». Ce qui veut dire : investissons dans l'avancée des sciences et des techniques, mais investissons, tout aussi bien, dans la lutte contre la malaria, par exemple, et, de manière plus générale, dans la lutte contre la grande pauvreté et l'analphabétisme, qui pèsent encore sur une grande partie de l'humanité actuelle. Puisqu'il s'agit là, à l'évidence, d'un immense gâchis de capital humain et social, investir ainsi aura un rendement social très élevé et armera efficacement les sociétés de l'avenir en augmentant leur capacité à faire face aux conséquences, éventuellement néfastes pour elles, de notre consommation actuelle de capital naturel.

Il existe cependant un argument de poids allant à l'encontre de cette vision des choses. Reste-t-elle défendable, si certains éléments du capital naturel s'avéraient, d'une part, insubstituables, et s'ils pouvaient, d'autre part, être dégradés de manière irréversible ? Dans ces conditions, quel que soit le prix qu'elle serait prête à payer pour cela, une génération à venir ne pourrait ni les reconstituer ni les remplacer. Par exemple, on peut douter que si le Gulf Stream s'évanouissait, les techniques humaines pourraient le faire renaître. Ou que si le tiers du Bangladesh était submergé, ses habitants trouveraient aisément où vivre ailleurs. Ou encore, on peut faire remarquer que même si l'on parvenait à ressusciter le corps des gorilles, que l'on aurait congelés avant leur extinction totale et à reconstituer la forêt primaire où ils vivaient, on aurait cependant perdu leur « culture », dont on connaît désormais la complexité.

Cette conviction qu'une part au moins du capital naturel est insubstituable et irréversiblement dégradable conduit à une seconde famille de normes : « il faut transmettre intégralement le capital naturel non-substituable et compenser efficacement le capital naturel substituable ». Il s'agit bien d'une famille de normes. Celle-ci s'étendrait donc de la sacralisation de la nature – « le capital naturel est entièrement insubstituable, par conséquent la nature doit rester inviolée et nous devons la transmettre intégralement telle que nous l'avons reçue » – à des positions plus modérées. Ces dernières identifient les principaux risques de dégradations irréversibles d'éléments de capital naturel très difficilement substituables et appliquent à leur égard un « principe de précaution », nom actuellement donné à ce type de norme.

### Les conséquences de normes de type « principe de précaution »

A titre d'illustration, si nous adoptons une norme de ce type, voici quelles en seraient les prescriptions dans le domaine des ressources épuisables et renouvelables.

La plupart des ressources épuisables actuellement extraites du sous-sol présentent une ou plusieurs des caractéristiques suivantes. Soit elles sont extrêmement abondantes, à leur coût actuel d'extraction. C'est le cas, par exemple, des minerais de fer ou d'aluminium, deux substances très abondantes dans la croûte terrestre. Soit elles sont recyclables et recyclées dans des proportions variables croissant avec l'augmentation du coût de la ressource primaire. C'est le cas de la plupart des métaux et, plus généralement, des substances dont la consommation n'altère pas chimiquement et ne disperse pas trop physiquement les molécules dans l'environnement. Soit elles sont substituables par des ressources abondantes d'un coût plus élevé. C'est le cas, on l'a dit, du pétrole conventionnel.

Prenons l'exemple du lithium. La perspective d'un développement rapide de véhicules électriques à batteries au lithium fait craindre à certains une pénurie prochaine de ce métal. Cela constituerait un sérieux obstacle au développement d'une technologie qui, sous réserve d'une production d'électricité dé-carbonée, contribuerait fortement à la lutte contre le changement climatique dans le domaine des transports. Mais l'augmentation des prix du lithium que cette perspective a déjà et peut encore engendrer va relancer la recherche de nouveaux gisements de lithium, dont nous n'avons aujourd'hui aucune idée précise des réserves « ultimes », c'est-à-dire disponibles à un coût inférieur à celui d'un substitut abondant. Elle rendra, de plus, très profitable, une fois réalisé le premier équipement du parc, le recyclage des batteries. Enfin, elle stimulera la recherche pour abaisser les coûts d'autres solutions techniques pour les batteries.

Autre exemple : une inquiétude s'est manifestée, plus récemment, à propos du phosphore, un fertilisant en effet insubstituable. Or, une nette augmentation du prix des phosphates naturels, alignés depuis près de trente ans sur les coûts de production des meilleures réserves mondiales (situées, en particulier, au Maroc), accroîtrait significativement le volume des réserves et stimulerait des économies dans leur utilisation et un certain recyclage par une modification des pratiques agricoles, par ailleurs nécessaire pour bien d'autres raisons (5).

Dans le domaine des ressources « épuisables », on parvient donc à une conclusion simple et robuste. Par définition, leur exploitation par la génération présente les « dégrade », en ce sens qu'elle réduit un stock incontestablement fini. Cependant, d'une part, cette « dégradation » connaît des mécanismes économiques régulateurs qui passent par l'augmentation des prix relatifs et, d'autre part, aucune d'entre elles n'est vraiment insubstituable. La raréfaction de certaines d'entre elles prendra simplement la forme d'une évolution des prix relatifs de ces ressources, les unes par rapport aux autres, et par rapport aux autres capi-

taux. Les normes du type « principe de précaution » n'ont donc aucune justification à leur sujet. Il n'y a aucune raison de ne pas les exploiter sans contrainte et il faut commencer, naturellement, par exploiter les moins coûteuses (6).

En revanche, que nous dit la théorie économique si l'on adopte une norme d'équité intergénérationnelle très exigeante, par exemple : « le bien-être des générations futures, après l'épuisement des moins coûteuses de ces ressources, doit rester au moins égal au nôtre » ? La réponse est qu'il faut (toujours sans état d'âme) exploiter d'abord les réserves à bas coût, mais que, si l'on veut que le bien-être des générations futures n'en soit pas affecté, il faut aussi réinvestir intégralement les rentes minières dans d'autres formes de capital transmissibles à la génération suivante (7) (la rente minière étant la différence entre le prix de marché et le coût d'extraction d'un gisement particulier). Les rentes minières reviennent normalement aux Etats « propriétaires » des ressources du sous-sol, au nom de la génération actuelle et des générations futures. C'est donc aux Etats de réinvestir les rentes. Mis à part la Norvège, et à un certain degré l'Alaska, le Botswana et certains Etats pétroliers peu peuplés du Golfe arabo-persique, aucun ne le fait actuellement (8). Ils se comportent donc d'une manière telle que le niveau de bien-être de ces pays chutera, quand leurs réserves seront épuisées.

S'agissant des ressources renouvelables, si l'on adopte une norme « de précaution », la seule question pertinente est celle-ci : quels sont les éléments du capital naturel dont la disparition ou la modification serait à la fois irréversible et porteuse de conséquences potentiellement très coûteuses pour les générations à venir, parce qu'ils sont insubstituables ? Un élément fondamental du capital naturel renouvelable vient aussitôt à l'esprit : les sols. Il est parfaitement possible de nourrir correctement les 9 milliards d'individus que comptera l'humanité à son apogée numérique. Mais ce sera incontestablement beaucoup plus coûteux, si on laisse les sols se dégrader au rythme actuel. D'où la nécessité d'une agriculture plus respectueuse des sols et de l'environnement (9). Le consensus actuel y ajoute la biodiversité et le climat, deux questions étroitement liées entre elles. Dans les deux cas, on estime, en effet, qu'il existe, aujourd'hui, de fortes raisons d'anticiper, pour la fin du siècle, des phénomènes irréversibles, potentiellement très coûteux.

### Le débat de fond

On voit que le débat de fond porte sur ce qui, dans notre capital naturel, est substituable ou non. C'est donc

un débat sur le potentiel des sciences et des techniques et, plus généralement, sur la capacité de l'humanité à maîtriser la nature, y compris – et surtout – en s'adaptant aux changements de cette dernière, ce qu'elle a fait jusqu'à ce jour. Rien de ce que nous croyons savoir avec certitude aujourd'hui ne permet de trancher ce débat. Chez les uns comme chez les autres, c'est affaire de convictions. Ce que nous ferons dépendra de la norme qui l'emportera. Contrairement à ce que l'on dit trop souvent, le débat essentiel n'est pas « éthique ». On peut manifester le même souci des générations futures et différer profondément quant aux croyances aux « progrès » dans l'évolution du monde, à la capacité de l'homme à maîtriser et à respecter la nature. C'est, au fond, un débat politique, actif depuis Descartes. Rien n'assure que les convictions qui s'affrontent aujourd'hui ne paraîtront pas fantaisistes aux générations futures. Mais c'est là tout ce dont nous disposons pour décider. Certes, ce débat est informé par les sciences de la nature et par l'économie. Mais il reste un résidu, irréductible par la preuve scientifique, qui exige un pari.

### Notes

\* Professeur d'économie – Mines ParisTech.

(1) Capital humain : les connaissances et savoir-faire que possèdent les hommes. Capital social : leur capacité à agir ensemble. Capital technique, autrement appelé capital produit : les artefacts qui servent de moyens de production.

(2) Voir, par exemple, pour le pétrole, l'article de Bruno Weymuller, dans ce numéro de Responsabilité et Environnement.

(3) Voir l'article de Denis Babusiaux et Axel Pierru (*ibidem*).

(4) C'est ainsi qu'une partie des « aires protégées », ces parcs où l'on tente de préserver la nature intacte, sont financées par des fonds privés.

(5) Voir l'article de Michel Griffon (*ibidem*).

(6) Nous ne tenons pas compte ici d'une contrainte liée au climat. Mais celle-ci peut être internalisée au moyen d'un coût du carbone, ce qui ne change rien à la règle énoncée ci-dessus.

(7) C'est la règle dite de Hartwick : voir Hartwick, John M. [1977], *Intergenerational Equity and the Investment of Rents from Exhaustible Resources*, *American Economic Review*, 67, December, pp. 972-74.

(8) Voir l'article de Paulo de Sa et Gary McMahon (*ibidem*).

(9) Voir l'article de Michel Griffon (*ibidem*).

## Seule certitude pour 2010 : l'instabilité

**Par rapport aux niveaux très déprimés du début de 2009, de très nombreux produits ont vu, en 2009, leurs prix doubler et s'approcher à nouveau des sommets qu'ils avaient atteints au printemps 2008. Du côté de l'offre, 2009 a été marquée par les efforts des producteurs pour ajuster leurs exportations. Mais tout cela n'aurait pas suffi, s'il n'y avait eu la Chine, sa reprise économique et ses besoins d'importer...**

par Philippe CHALMIN\*

Les marchés mondiaux de matières premières et de commodités ont terminé l'année 2009 en fanfare, affichant des prix records pour des produits aussi différents que le sucre, le cacao ou le thé. Si l'on y ajoute le jus d'orange congelé, cela fait presque trente ans qu'un petit déjeuner n'avait coûté aussi cher sur la base des prix internationaux !

Mais tout aussi impressionnant est le rebond des prix des métaux et de l'énergie, des 80 dollars le baril de pétrole aux 7 500 dollars la tonne de cuivre, sans oublier le plomb et, pour les produits agricoles, le caoutchouc et même le coton. Par rapport aux niveaux très déprimés du début de 2009, de très nombreux produits ont vu leurs prix doubler et s'approcher à nouveau des sommets qu'ils avaient atteints au printemps 2008. La descente aux enfers du deuxième semestre 2008 serait ainsi quasi oubliée, à quelques exceptions notables près, comme les céréales ou l'acier.

L'image est assez différente si l'on raisonne – ce qui a plus de sens, du point de vue économique, tant pour les producteurs que pour les consommateurs – en termes de moyennes annuelles : l'année 2009 s'inscrit alors en retrait d'un bon tiers par rapport à 2008, avec une baisse de 37 % pour le pétrole, de 25 % pour le cuivre, de 35 % pour l'aluminium... Les seuls produits à s'inscrire en positif sont le sucre (+35 %), le thé (+33 %), le cacao (+11 %) et aussi, tout de même, l'or (+11 %). Quelle que soit la manière dont on calcule, le sucre a été la vedette incontestable de l'année 2009 et la chute la plus forte a été celle du fret maritime (l'indicateur *Baltic Dry Index*, basé sur le vrac sec), qui a perdu 59 % de sa valeur, malgré une légère reprise en fin d'année, tout au moins pour les plus gros navires (notamment ceux qui approvisionnent la Chine en minerai de fer et en charbon).

2009 n'est donc pas parvenue à effacer une année 2008 qui restera dans les annales en raison de son profil extraordinaire : une véritable bulle, au premier trimestre (alors que l'économie américaine était déjà en récession), puis, au lendemain de la clôture des Jeux olympiques de Pékin, un véritable plongeon, que la crise financière a transformé en débâcle. Au début de 2009, la plupart des marchés avaient retrouvé leurs niveaux du début de 2007, voire, pour les plus

touchés (comme le fret maritime ou le pétrole) ceux de 2004. Dans un contexte de récession économique mondiale, nul n'imaginait qu'un quelconque rebond eût été possible. Au contraire, même : on assistait à un mouvement massif de déstockage de la part des entreprises, en panne à la fois de débouchés et de liquidités. Or, entre décembre 2008 et décembre 2009, en moyennes mensuelles, les prix des matières premières (mesurés par l'indice « Cyclope ») se sont appréciés de 70 % en US dollars, avec des records à plus de 130 %, pour le plomb et le cuivre. Cette performance, assez comparable somme toute à celle des bourses de valeurs, contraste avec l'atonie de la reprise économique mondiale, en particulier aux Etats-Unis et en Europe, d'où une certaine impression que les marchés, victimes d'une euphorie excessive, ont « suracheté » la reprise. En fait, on pourrait résumer *grosso modo* la conjoncture des marchés en 2009 à deux facteurs majeurs – la Chine et le dollar –, l'ensemble étant enveloppé par un bouillonnement spéculatif.

### Une conjoncture plus « chinoise » que jamais

On ne répétera jamais assez que le facteur majeur de la formation des prix des matières premières demeure le rapport entre l'offre et la demande sur le marché physique. Du côté de l'offre, 2009 a été marquée par les efforts des producteurs pour ajuster leurs exportations : les membres de l'Opep sont parvenus, tout au moins pendant quelques mois, à tenir leurs engagements de réduction de quotas à hauteur de 5 millions de barils/jour. Il en va de même en ce qui concerne les producteurs de caoutchouc. La plupart des compagnies minières, ainsi que les sidérurgistes, ont drastiquement réduit leurs productions, jusqu'à 50 % des capacités installées, en ce qui concerne l'acier, dans le monde occidental ! A cela, il faut ajouter des problèmes climatiques (sécheresse en Afrique orientale, pour le thé, en Inde, pour le sucre), des maladies (pour le cacao, en Côte d'Ivoire), et des gelées (pour les oranges, en Floride). Ces aléas n'ont pas toujours joué dans le même sens : ainsi, au contraire, d'excellentes récoltes, un peu partout dans le monde, ont

pesé sur les marchés céréaliers. Enfin, la scène géopolitique a apporté son lot habituel de troubles (notamment au Nigeria) et de grèves (au Canada et au Chili).

Mais tout cela n'aurait pas suffi s'il n'y avait eu la Chine, sa reprise économique et ses besoins d'importer. Qu'il s'agisse de pétrole, de métaux ou de soja, la Chine n'a cessé d'augmenter ses importations, bien souvent au-delà même de ses besoins les plus immédiats, en profitant de la faiblesse des prix mondiaux pour reconstituer ses réserves stratégiques tant de pétrole que de métaux non ferreux, au travers du désormais célèbre *State Reserve Bureau* (SRB). Dans bien des cas, la stratégie chinoise a été difficile à comprendre, ces achats ayant été réalisés de manière brutale et ayant provoqué d'importantes hausses de prix, notamment pour le minerai de fer ou le charbon, le cuivre ou le nickel et, bien sûr, le fret maritime, notamment en ce qui concerne les vraquiers-minéraliers géants (les *Capesizes*). Il est probable qu'une partie de ces achats a revêtu un caractère spéculatif de la part d'entreprises soucieuses de couvrir leur risque face à l'affaiblissement du dollar (et donc du yen) et qui, ne pouvant détenir de positions sur les marchés monétaires du fait du contrôle des changes, se sont en quelque sorte « arbitrés » avec des stocks physiques de produits cotés en dollar : cela a été certainement le cas pour le nickel et le cuivre (et peut-être, même, pour le minerai de fer).

La Chine est donc devenue le principal importateur mondial de matières premières et on a vu les entreprises et l'État chinois avancer leurs pions dans de très nombreux pays producteurs au moyen d'achats, lorsque cela était possible (Australie), de partenariats (Amérique latine) et d'investissements (Afrique, Asie centrale et même Russie). La Chine a aussi limité tant ses exportations (en jouant sur les taxes à l'exportation) que ses quotas, au point de soulever les protestations de ses partenaires occidentaux acheteurs de terres rares ou de charbon à coke.

A terme, la dépendance des marchés mondiaux vis-à-vis de la Chine et de son comportement à la fois conjoncturel et stratégique a de quoi inquiéter. Le moindre retrait chinois des marchés, comme cela avait été le cas en ce qui concernait le soja, en 2004, ou pour les vieux papiers (entre autres), en 2008, pourrait avoir des conséquences démesurées et provoquer un véritable effondrement des cours des matières premières.

Au fond, malgré (ou à cause de) l'ampleur de ses besoins, en 2010, c'est la Chine qui détient la véritable « arme » des matières premières, à savoir qu'elle est cet acheteur solvable de dernier recours capable par une simple décision (plus ou moins rationnelle) de changer la face des marchés.

### Le retour de l'étalon matières premières

Exprimé en euros, le cours du dollar a connu de fortes amplitudes (entre 1,25 dollar et 1,55 dollar pour un euro, tout au long de l'année 2009). Nombre de responsables

politiques et monétaires, inquiets de cette volatilité, ont même souhaité inventer quelque nouvel étalon (voire une véritable monnaie mondiale). Bien entendu, nous en sommes fort loin. Mais, sur les marchés de matières premières, le paramètre monétaire est devenu essentiel et, tout au long de 2009, la baisse du dollar a accompagné la hausse des matières premières (à la notable exception des dernières semaines de l'année). Pour beaucoup d'investisseurs, l'or a ainsi retrouvé son caractère de refuge ultime ; c'est en l'occurrence la principale cause de la hausse continue qui a propulsé l'once de métal jaune au-dessus des 1 200 dollars. Mais on peut estimer qu'il en a été de même pour beaucoup d'autres produits (notamment pour le pétrole et les métaux), qui ont profité d'arbitrages monétaires opérés par des investisseurs financiers qui se sont rués (à hauteur de 60 milliards de dollars supplémentaires) sur cette nouvelle classe d'actifs, au travers de produits comme les indices ou les *trackers* (ou *Exchange Traded Funds* – ETF) (1). L'augmentation des volumes spéculatifs a été un des événements marquants de 2009 ; elle a suscité maintes controverses, ainsi que des mises en garde émanant des autorités de marché, notamment de la *U.S. Commodity Futures Trading Commission* (CFTC) (2), aux Etats-Unis. C'est là un débat assez traditionnel et on peut mettre en évidence le comportement tout aussi volatil de nombre de marchés allant du riz à l'acier et même aux produits laitiers (pour lesquels il n'existe pas de produits dérivés, et donc de support pour la spéculation financière). Néanmoins, à la fin de 2009, on peut penser que les fonds spéculatifs ont contribué à cette espèce d'euphorie qui a régné sur les marchés.

Au final, pourtant, ce sont les échanges physiques qui, au final, auront raison. Et au rebours de l'enthousiasme actuel, c'est la prudence qui s'impose pour l'année 2010. Les marchés ont « acheté » la reprise bien avant que celle-ci n'ait été une réalité et ils se trouvent aujourd'hui dans une position, bien inconfortable, de dépendance vis-à-vis d'un débouché chinois beaucoup plus aléatoire qu'on ne le pense généralement, à l'horizon 2011. Dans nombre de secteurs, les surcapacités sont manifestes et, paradoxalement, c'est précisément là où l'investissement serait le plus nécessaire, à savoir l'agriculture au sens le plus large, que les marchés – des céréales, en particulier – sont restés les plus déprimés.

Une seule certitude, en conclusion, celle de l'instabilité et d'une volatilité extrême, à l'image des marchés financiers. Plus que jamais, « la hausse est à craindre, mais la baisse est à redouter ». Voilà qui est bien peu rassurant, pour 2010 !

### Notes

\* CCE, professeur associé à Paris-Dauphine, membre du Conseil d'analyse économique, président de Cyclope.

(1) Un *tracker* est un fonds indicel coté (*Exchange Traded Fund*).

(2) *The U.S. Commodity Futures Trading Commission* (CFTC) est l'autorité américaine de régulation des marchés des matières premières.

## Les perspectives de l'offre mondiale de pétrole

**L'analyse des ressources pétrolières ne doit pas être uniquement menée *below the ground*, mais aussi *above the ground*. La capacité de production industriellement installée constitue un goulot annuel qui agit comme un régulateur de débit sur les flux annuels de production issus du stock de réserves pétrolières. Ceci amène à prévoir, pour la prochaine décennie, un plateau pétrolier, davantage qu'un pic pétrolier.**

par Bruno WEYMULLER\*

Toute réflexion sur l'évolution à moyen et à long terme de l'offre pétrolière mondiale doit partir d'une analyse de nature géologique, mais ne saurait se limiter à ce seul éclairage.

### Le point de vue des géologues

Depuis longtemps, la communauté des géologues pétroliers multiplie les mises en garde, constatant la forte diminution du nombre et de la taille des nouvelles découvertes de pétrole dans le monde et ce, depuis les années 1970. Et elle tente, avec le concept de « pic pétrolier », de sensibiliser l'opinion à la perspective d'une raréfaction des ressources pétrolières.

Les premières publications de King Hubbert, géophysicien américain de la Shell, remontent aux années 1950 : il prévoyait que le niveau de la production pétrolière aux États-Unis (hors Alaska) plafonnerait aux environs des années 1970, puis déclinerait à rythme rapide. Dans les faits, le plafonnement de la production dans cette région du monde s'est produit un peu plus tard, mais d'une manière relativement conforme à l'analyse de Hubbert. Cela a conféré de la crédibilité à la deuxième partie de sa thèse, selon laquelle environ la moitié des réserves ultimes d'une province pétrolière aura été produite à la date du pic de production, tandis que la seconde moitié sera produite postérieurement à ce pic, avec des niveaux de production annuels décroissant rapidement.

Dans la foulée, de nombreux travaux similaires ont été menés sur d'autres zones, initialement sur des provinces pétrolières matures, mais ces travaux ont ensuite été étendus à l'ensemble de la planète. C'est ainsi que la vision d'un « pic pétrolier mondial » a alors pris forme. Annoncé initialement par les plus pessimistes pour le début du troisième millénaire, celui-ci est actuellement pronostiqué par beaucoup d'auteurs pour la décennie qui commence. Récemment, une étude complète a été conduite par les géophysiciens du groupe pétrolier Total sur les perspectives de l'offre mon-

diale de pétrole. Ses conclusions ont été publiées (1) et nous nous y référons.

Ces travaux, en amont de l'aspect aval de l'offre (les capacités de production et de distribution aux consommateurs), se concentrent sur l'apport des méthodes des géosciences à l'estimation des réserves pétrolières ultimes qui pourront être exploitées, et à l'analyse des contraintes de nature géologique pesant sur leur rythme d'extraction. Un rappel : la production pétrolière cumulée passée est estimée (les statistiques anciennes sont peu fiables...) à 150 milliards de tonnes, soit environ 1 000 milliards de barils. Actuellement, le niveau de la production mondiale annuelle est de l'ordre de 4 milliards de tonnes, soit environ 30 milliards de barils (ce qui correspond à 82 millions de barils/jour). Que peut-on espérer pour le futur ? Il faut distinguer clairement quatre catégories de ressources pouvant composer l'offre future :

### *Le potentiel ultime des zones pétrolières connues de nos jours*

On se limitera, à ce stade, aux pétroles conventionnels, en excluant les huiles extra-lourdes ou bitumineuses (définies en fonction de leur densité, limitée en général à 12° API, et de leur viscosité). Le raisonnement des géologues part d'une estimation des accumulations pétrolières (le pétrole en place sous terre), qui est obtenue par une analyse *bottom-up* à partir des champs épuisés ou en production à ce jour.

De nombreuses informations sur ces champs sont disponibles dans les bases de données des consultants (tels notamment que Wood Mackenzie ou IHS) et elles ont été synthétisées dans de nombreuses publications. Pour passer des accumulations aux ressources productibles, il faut apprécier le taux de récupération ultime.

En effet, on ne récupère qu'une partie de l'huile en place. Pour des raisons géologiques, après quelques années d'exploitation, la production issue d'un puits pétrolier comprend

des arrivées d'eau significatives, la production d'huile décline et, au bout d'un certain temps, le puits doit être arrêté. Actuellement, le taux de récupération moyen dans le monde est estimé à 32 % des accumulations. Quelle est l'évolution possible de ce taux de récupération, dans le futur ?

La récupération ultime dépend de la nature géologique du gisement. De façon plus précise, les conditions de récupération conduisent à distinguer deux grandes catégories de gisements, les gisements à réservoirs carbonatés et les gisements à réservoirs gréseux, qui se distinguent par des relations différentes entre taux de soutirage et taux de récupération. Les caractéristiques géologiques des réserves à exploiter dans le futur sont donc un facteur explicatif de l'évolution du taux de récupération.

Mais la récupération fait aussi intervenir le recours à des techniques mises au point par les ingénieurs, déjà utilisées aujourd'hui, mais qui sont susceptibles d'être encore améliorées :

- ✓ L'amélioration simple de la récupération (IOR : *Improved Oil Recovery*) :
  - Multiplication des puits ;
  - Maintien de l'énergie des gisements (injection d'eau...) ;
  - Hausses de prix modifiant les conditions économiques du *cut off*.
- ✓ Les techniques avancées (EOR : *Enhanced Oil Recovery*) :
  - Injection de produits chimiques : polymères, tensioactifs, etc. ;
  - Chauffage du réservoir naturel.

Après une analyse approfondie des aspects géologiques et technologiques, l'étude de Total retient une amélioration possible du taux moyen de récupération (au niveau mondial) de 5 points (de 32 % à 37 %).

Est-ce trop conservateur ? Certains experts pensent que l'on peut espérer aller significativement plus loin (mais, le plus souvent, sans argumenter réellement leur optimisme). Les quantités de pétrole potentiellement gagnées dans ce cas ne seraient pas négligeables, tout en restant limitées, à l'échelle des réserves mondiales.

Dans une étape suivante, l'apport des condensats venant des champs de gaz doit être évalué et inclus à la production pétrolière, car il s'agit bien de liquides pétroliers.

L'étude de Total conclut finalement que les réserves encore récupérables dans les zones connues peuvent être estimées à 1 300 milliards de barils (y compris 300 milliards de barils provenant de l'amélioration des taux de récupération).

### *Le potentiel escompté des zones pétrolières nouvelles restant à découvrir*

Par nature, ces zones nouvelles sont mal connues. Mais la difficulté est renforcée par le fait que, dans les dernières décennies, l'activité d'exploration a été concentrée au niveau mondial sur les provinces déjà reconnues et que l'on dispose donc, dans ces zones nouvelles, de très peu de puits d'exploration, et même rarement d'observations sismiques. Le travail des géophysiciens consiste à prendre en considération les quelque deux cents bassins sédimentaires repérés

sur la planète et à tenter d'en estimer les réserves par différentes approches complémentaires, naturalistes et statistiques. Délicate, cette recherche mobilise tous les progrès récents de la science.

L'étude de Total aboutit à un potentiel de réserves récupérables évalué entre 200 et 350 milliards de barils. Cela représente un potentiel relativement réduit.

Une analyse de l'*US Geological Survey*, plus ancienne (2000) et fondée elle aussi sur une analyse des différents bassins mondiaux, avançait un chiffre deux fois plus élevé.

Mais, au-delà des chiffres portant sur le potentiel ultime, la principale incertitude pour apprécier la contribution de ces réserves restant à découvrir à la disponibilité pétrolière future tient au fait que la date d'ouverture à l'exploration de beaucoup de ces bassins potentiels est très difficile à préciser (c'est notamment le cas, par exemple, en Arctique).

### *Les réserves d'huiles lourdes non-conventionnelles*

Même s'il y a une continuité entre les différents types de pétrole, la catégorie des bruts extra-lourds et visqueux doit être analysée à part, essentiellement en raison des modalités très spécifiques de leur production (exigeant de recourir à des techniques minières, suivies d'une phase, complexe, d'*up-grading* des productions, nécessaire à l'obtention de produits commercialisables).

Les accumulations géologiques *a priori* considérables (au Venezuela et au Canada, principalement, mais sans doute, aussi, ailleurs dans le monde) peuvent être appréciées, même si c'est avec un large degré d'incertitude. En revanche, il est très difficile d'anticiper leur taux de récupération ultime. Celui-ci sera, davantage qu'en ce qui concerne les réserves conventionnelles, sensible au prix futur du pétrole. L'étude de Total retient, à ce titre, des réserves récupérables de l'ordre de 600 milliards de barils.

Mais les défis de la production de ce type de réserves ne sont pas tous bien résolus, notamment celui de leur impact environnemental. De longs délais seront donc observés avant toute production effective importante, mais on peut envisager qu'ensuite, cette production puisse être maintenue pendant longtemps.

### *Enfin, mentionnons une dernière catégorie, d'une nature très différente : les pétroles (ou les produits pétroliers) de synthèse*

Il s'agit de produits pouvant être substitués aux produits pétroliers naturels dans leurs usages de carburants ou de combustibles (d'où l'inclusion de produits cousins des produits pétroliers, tels que des alcools, des esters et des huiles). Différentes filières d'élaboration doivent être prises en considération :

- ✓ les produits liquides obtenus à partir d'autres formes de carbone fossile (gaz, charbon) en recourant, le plus souvent, au procédé Fisher-Tropsch, ou encore les bio-fuels obtenus à partir de carbone renouvelable (biomasse) au moyen de différentes techniques de production ;

- ✓ les produits extraits de schistes bitumineux (*shale oils*), qui sont chimiquement différents des sables bitumineux (*tar sands*). La source d'énergie est du kérogène et non un hydrocarbure et elle doit être traitée chimiquement (par pyrolyse) pour obtenir un produit qui soit utilisable ;
  - ✓ enfin, la piste, encore théorique, de la carbonylation de l'hydrogène (HTL). Bien sûr, pour que cette ressource constitue un véritable apport supplémentaire aux ressources minières, il faut que l'hydrogène utilisé ne soit pas obtenu à partir d'hydrocarbures, mais à partir du nucléaire ou d'énergies renouvelables, et que le carbone ne provienne pas, lui non plus, de ressources pétrolières.
  - ✓ 1 300 milliards de barils dans les zones aujourd'hui connues, dont 300 milliards liés à l'amélioration de la récupération (en rapportant ce chiffre de 1 300 milliards à la production annuelle actuelle de pétrole dans le monde, on obtient un ratio d'un peu plus de 40 ans) ;
  - ✓ de 200 à 350 milliards de barils de réserves à découvrir dans de nouvelles zones ;
  - ✓ 600 milliards de barils d'huiles extra-lourdes.
- En introduisant les contraintes géologiques pesant sur le rythme d'extraction des gisements, en tenant compte de leurs caractéristiques et de certaines hypothèses sur les dates de mises en production futures, la conclusion de



© Jiri Reza/REA

« Les produits extraits de schistes bitumineux (*shale oils*) sont chimiquement différents des sables bitumineux (*tar sands*). La source d'énergie est du kérogène et non un hydrocarbure et elle doit être traitée chimiquement (par pyrolyse) pour obtenir un produit qui soit utilisable ». Exploitation de sables bitumineux à Fort Mc Murray dans l'Alberta (Canada).

Pour toutes ces filières, les aspects de leur consommation énergétique dans la phase de fabrication, de leur coût et de leur impact environnemental restent toutefois à améliorer considérablement. Ainsi, le potentiel et le profil de production future de ces ressources sont donc très difficiles à préciser aujourd'hui. Par contre, ces filières peuvent ouvrir la voie à une production durable de produits pétroliers.

Dans une **analyse géologique** du futur, on n'inclut pas ces produits de synthèse, mais seulement les trois premières catégories de ressources relatives aux gisements pétroliers naturels épuisables. Selon l'étude de Total, les réserves restant à produire peuvent être estimées à :

l'étude de Total est celle-ci : l'offre pétrolière mondiale pourrait suivre une demande croissant en moyenne de 1,4 % l'an jusque vers la fin de la décennie, où elle atteindra un plafond de l'ordre de 95 millions de barils/jour (soit seulement un peu plus de 10 millions de b/j au-dessus du niveau actuel).

Cela n'est pas très éloigné de la thèse de Hubbert, transposée au niveau mondial : si on admet que la moitié des réserves globales est produite au pic, celui-ci devrait se produire vers 2020 (en appliquant la schématisation de la courbe en cloche seulement à la catégorie des réserves conventionnelles des zones connues et en estimant que les deux autres catégories de réserves, compte tenu des délais

de mise en œuvre de leur exploitation, contribueraient plutôt à ralentir, à un horizon plus éloigné, le rythme du déclin de la production mondiale).

### **Les contraintes des capacités de production : du pic au plateau**

Mais l'analyse ne doit pas être uniquement menée *below the ground*, mais aussi *above the ground*. La capacité de production industriellement installée constitue un goulot annuel qui agit comme un régulateur de débit sur les flux annuels de production issus du stock de réserves pétrolières. Or, il existe plusieurs types de contraintes spécifiques, à ce niveau.

#### *Les contraintes industrielles*

- ✓ La disponibilité de capacités nouvelles de production dépend des décisions d'investissement prises par les opérateurs pétroliers et de la durée de la phase de développement. Or, on a constaté, durant la dernière décennie, de nombreux retards dans les projets pétroliers, dont les plus marquants ont été largement commentés dans la presse spécialisée. Les causes sont diverses : lenteur du processus d'approbation des projets, difficultés techniques, tensions sur les marchés des équipements et des services pétroliers...

Mais les conséquences sur la capacité d'offre ont été significatives et elles risquent de se reproduire à l'avenir ;

- ✓ Il faut rappeler bien évidemment que, pour obtenir globalement une croissance nette des capacités de production installées, il faut d'abord compenser le déclin des productions actuelles (qui est important, même si l'on cherche à l'atténuer par des investissements et de nouvelles technologies).

Ainsi, pour assurer une croissance nette de l'offre de 1,5 % l'an, et si on fait face à un déclin des gisements existants de 7,5 %, c'est une augmentation brute de 9 % l'an qu'il faut assurer en développant de nouveaux gisements. Le défi industriel est considérable et immédiat : au niveau mondial, il faut mettre en production tous les deux ans de nouvelles capacités représentant l'équivalent de la capacité de production actuelle de l'Arabie Saoudite... ;

- ✓ Un autre facteur important est le rythme du progrès des technologies.

Ces progrès (dans les techniques de traitement sismique et d'exploration, les forages et les puits, ainsi que dans les techniques de production et d'exploitation) permettent de développer de nouvelles réserves plus difficiles à produire et de réduire les coûts d'extraction et de traitement. Mais il faut noter que, dans l'industrie pétrolière, les innovations (souvent incrémentales et spécifiques à un volet du schéma industriel d'ensemble) sont en général introduites à l'occasion de nouveaux développements de gisements. Et la diffusion des expériences est traditionnellement assurée, pour une part importante, par les compagnies internationales. Les retards pris sur les nou-

veaux projets de celles-ci représentent donc un facteur de ralentissement du progrès technique et aboutissent à repousser dans le temps l'accès à de nouvelles réserves ;

- ✓ Les besoins de financement futurs dans le secteur pétrolier sont considérables, en raison des défis techniques et de la hausse des coûts (y compris les coûts de type HSE). Certes, l'épargne mondiale est très abondante, mais il n'est pas assuré qu'elle s'investira suffisamment dans des projets pétroliers risqués.

Il faut souligner que la diminution de la position relative des grandes compagnies internationales par rapport aux compagnies nationales n'est pas un facteur favorable, car ces dernières investissent moins, et se cantonnent, le plus souvent, à un périmètre géographique d'activité restreint.

Mais il y a, de surcroît, d'autres limites au niveau de production, qui ne sont pas de nature industrielle.

#### *Les contraintes politiques et géopolitiques*

Dans une analyse à moyen et long terme, on n'évoque pas le rationnement des productions décidées à certaines périodes par les pays producteurs (quotas OPEP), car il s'agit là plutôt d'une régulation à court terme du marché pétrolier. Quant aux désordres politiques intérieurs que connaissent plusieurs pays producteurs (Nigeria, Irak, etc.), ils impactent parfois fortement leur production pétrolière et cette situation peut se prolonger pour des durées difficilement prévisibles. Mais il faut souligner deux tendances pérennes, qui sont susceptibles de modifier significativement le profil futur de l'offre :

- ✓ Le nationalisme renforcé des pays producteurs les conduit souvent à limiter l'accès aux réserves des zones prometteuses. Les restrictions à l'activité des compagnies internationales peuvent retarder pour une longue période la mise en production de réserves potentielles (le Mexique a été longtemps un cas régulièrement cité, mais d'autres pays pétroliers importants sont venus s'ajouter à la liste : Venezuela, Russie...). Par ailleurs, beaucoup de ces pays ont cherché à développer leurs compagnies nationales (NOCs) et certaines ont acquis une réelle compétence. Mais, par nature, ces compagnies n'apportent pas les mêmes avantages que les compagnies internationales (IOCs) en matière de diffusion internationale du progrès technique et de motivation à développer des ressources nouvelles partout dans le monde ;

- ✓ La politique de gestion des réserves par les pays producteurs.

Ceux-ci intègrent explicitement désormais une vision nationale de long terme d'une politique d'extraction soutenable. Ce comportement, surtout s'il concerne des pays pétroliers importants (Arabie Saoudite et d'autres pays du Moyen-Orient), est de nature à impacter profondément le profil futur de la production mondiale.

#### *Un plateau pétrolier, davantage qu'un pic pétrolier*

Ces deux types de contraintes industrielle et politique conduisent à prévoir un lissage du profil de la production

pétrolière mondiale par rapport au profil géologique potentiel. La production sera plafonnée à un niveau inférieur au pic géologique. Par contre, ce niveau pourra être maintenu durant un certain temps, sa courbe présentant ainsi, un plateau. La vision qu'en a Total est qu'il sera difficile de produire beaucoup plus de 90 millions de b/j (2) à partir des gisements d'hydrocarbures. Cette vision est différente de celle (plus optimiste) d'Exxon, mais il est intéressant de noter que l'Agence Internationale de l'Énergie a progressivement rapproché ses prévisions de celles de Total, au cours des dernières années.

Les géologues tenants du *peak oil* soulignent que, dans une vision longue, cela ne modifie pas durablement la contrainte résultant des limitations d'ordre géologique.

Mais cette modification du profil de l'offre, tout en introduisant une contrainte sur le niveau annuel de la disponibilité mondiale, est très importante, en termes de gestion de la transition énergétique et d'équilibre du marché pétrolier.

### **Autres facteurs à prendre en compte pour apprécier la disponibilité future du pétrole**

#### *L'offre pétrolière rationnera la demande potentielle*

Le facteur nouveau de la situation pétrolière mondiale est le fait que la courbe d'offre de pétrole aura désormais du mal à suivre dynamiquement la croissance de la courbe de la demande pétrolière mondiale, même si l'on prévoit un ralentissement de son taux de croissance (passant à 1,2 % par an, plutôt que 1,4 % actuellement, et même 1,6 % par le passé).

Mais ces chiffres globaux de croissance ne soulignent pas assez une spécificité de la demande de pétrole, qui tient à l'importance de l'utilisation de produits pétroliers par le secteur des transports : ainsi, près de 60 % du pétrole est utilisé par les transports (essentiellement, les transports routiers) et 97 % de l'énergie utilisée dans les transports provient du pétrole. Or, dans cet usage, le pétrole est très difficile à remplacer.

Que peut-on faire pour réduire cette dépendance des transports vis-à-vis du pétrole ?

D'abord, promouvoir les économies de consommation : modification des comportements de conduite, rationalisation des usages de la voiture.

Mais, au-delà, les évolutions techniques et structurelles seront très progressives :

- ✓ la recherche de nouvelles motorisations (progrès encore possibles du moteur thermique, des hybrides, piste des moteurs électriques et de la pile à combustible) ;
- ✓ la réorganisation de la mobilité : optimisation des modes de transport et gestion de l'urbanisation.

Or, les besoins pétroliers des grandes économies émergentes sont potentiellement énormes et le développement du parc automobile de ces pays très peuplés conduira à un fort accroissement de la demande mondiale en pétrole.

Aujourd'hui, pour 1 000 habitants, il y a 800 voitures aux États-Unis, 600 en Europe, et seulement quelques dizaines en Chine (l'Inde arrivant très loin derrière celle-ci)...

Pour les pays les moins développés, les besoins pétroliers sont importants pour assurer leur développement (avantages pérennes du pétrole, pour ce type d'économie...) mais d'une ampleur relativement limitée, à l'échelle mondiale.

Ces caractéristiques de la demande pétrolière et de sa croissance future font que la vision d'un plateau de la production pétrolière pêche sans doute par excès d'optimisme.

La réalité sera plus heurtée, non sans ruptures d'équilibres et rationnements.

#### *La problématique climat/transition énergétique*

Comme toute énergie fossile dont l'usage conduit à des émissions de CO<sub>2</sub>, le pétrole est directement mis en cause dans les débats sur le réchauffement climatique, et cela est de nature à introduire des contraintes sur la production pétrolière.

Au cours de son cycle d'usage, de sa production à sa consommation finale, le pétrole conduit à des émissions de GES, mais avec des spécificités notables selon les phases :

- ✓ Lors de l'extraction, le principal problème provient du gaz associé dans les gisements d'huile, qui est torché, lorsqu'il n'est pas utilisé. S'il est en général très difficile de modifier après coup des installations conçues avec torchage, on peut, en revanche, le plus souvent trouver des solutions pour des développements nouveaux (réinjection de gaz, valorisation du gaz, parfois en mutualisant les productions de plusieurs champs, comme cela est pratiqué en Angola...). Mais ces schémas sont coûteux et fortement consommateurs d'énergie intermédiaire... ;
- ✓ Durant la phase de raffinage, les émissions de GES proviennent des consommations énergétiques et des hydrotraitements nécessaires à l'élimination des pollutions traditionnelles (renforçant ainsi les émissions de GES liées à la production d'hydrogène). Là encore, réduire les émissions d'une raffinerie existante est très difficile, car ces émissions sont réparties sur plusieurs unités et relativement diffuses. Des schémas de raffineries assez radicalement innovantes, qui permettraient de minimiser les émissions de GES, commencent toutefois à être décrits. Mais les zones OCDE ne sont pas propices à des constructions *grass root* et les pays émergents privilégient les options traditionnelles, moins coûteuses. Les techniques de CCS (capture et stockage de carbone) pourraient apporter une réponse partielle, à condition de disposer de sites appropriés de stockage à proximité ;
- ✓ Enfin, il faut rappeler que l'essentiel des émissions de GES liées au pétrole se produisent dans la phase finale d'utilisation des produits pétroliers en tant que combustible de chauffage ou comme carburants et que les moyens permettant de les limiter ne sont pas évidents.

Dans le contexte de la nécessaire transition énergétique à opérer dans le monde au cours des prochaines décennies, deux lignes directrices concernant le pétrole se dessinent nettement :

- ✓ économiser l'usage du pétrole, autant que possible ;
- ✓ favoriser, dans les débouchés où cela est possible, les substitutions « durables ».

Les principales substitutions que l'on peut envisager pour le pétrole sont :

- ✓ la suppression de l'usage du fuel lourd dans les centrales électriques ;
- ✓ la promotion de l'électricité à la place du fuel domestique, dans le chauffage, ou des carburants pétroliers, dans le secteur des transports.

Mais ces solutions de substitution n'ont d'intérêt que si l'électricité nécessaire est fabriquée sans émission de GES.

Et cela rejoint donc un des principaux défis énergétiques auxquels le monde est confronté : comment assurer l'essor d'une offre d'électricité non émettrice de GES ?

Le retard de la croissance du nucléaire et les limites des potentialités des énergies renouvelables, pour les prochaines décennies, représentent des contraintes sérieuses.

### Conclusion : le besoin d'une nouvelle gouvernance énergétique

Si l'on porte un regard historique sur l'activité pétrolière, il faut souligner que ce nouveau siècle s'ouvre dans un contexte fort différent du passé. Le thème de la « fin du pétrole » est à la fois inexact et trompeur. Ce qui est en jeu, c'est la perspective d'un rationnement mondial de la demande, avec la disparition d'une certaine flexibilité de l'offre à laquelle nous étions habitués, ainsi que la transformation de modes de régulation qui avaient, dans l'ensemble, assez bien fonctionné au siècle dernier :

- ✓ Les mécanismes de marché qui donnaient une certaine efficacité au signal prix.

Si la demande augmentait, le prix du pétrole s'élevait, des puits existants temporairement à l'arrêt étaient remis en production, donnant un répit pour assurer de nouveaux développements, si la hausse de la demande s'avérait durable.

Mais, comme l'article de D. Babusiaux et A. Pierru (dans ce numéro de Responsabilité et Environnement) le montre, les mécanismes actuels des prix pétroliers sont beaucoup plus complexes.

- ✓ Le rôle des sociétés multinationales pétrolières.

Dans un contexte où les réserves minières sont géographiquement très inégalement réparties et où les visions politiques sont étroitement nationales, les compagnies pétrolières internationales ont été, par le passé, un outil plutôt efficace : répartition des risques, diffusion internationale du progrès technique, développement de réserves nouvelles avec un horizon de planification de long terme.

Par nature, le *business model* des compagnies nationales est moins performant, au regard d'une gestion mondiale du pétrole.

Comme l'histoire revient rarement en arrière, notre conclusion sera qu'il y a un fort besoin d'une nouvelle gouvernance mondiale du pétrole. Mais cela sort du champ de cet article.

### Notes

\* ancien membre du Comité exécutif de Total.

(1) Jean-Marie Masset. « Pétrole, gaz : pic ou plateau », dans le Dossier spécial du BRGM, Dix grands enjeux des géosciences – 2009. P. R. Bauquis, ancien dirigeant de Total a aussi traité de cette question dans différentes publications. On signale notamment son étude, coécrite avec Denis Babusiaux : « Que penser de la raréfaction des ressources pétrolières et de l'évolution du prix du brut ? », *Les cahiers de l'économie* n°66 – IFP, septembre 2007.

(2) A cette production d'hydrocarbures naturels, se rajoute, pour satisfaire la demande finale, un certain montant de productions diverses (XTL, bio-fuels...) que l'on estime à 5 millions de b/j à moyen terme.

## Les évolutions du prix du pétrole

**La hausse brutale du prix du pétrole observée en 2008 – suivie d'une chute non moins spectaculaire – a été en grande partie attribuée par l'OPEP et certains responsables politiques et financiers non pas aux fondamentaux du marché, mais aux positions spéculatives prises par des investisseurs financiers sur les marchés à terme.**

par Denis BABUSIAUX\* et Axel PIERRU\*\*

Les évolutions récentes du prix du pétrole sont à l'origine de controverses sur le rôle joué par les marchés financiers et la spéculation. Dans cet article, nous résumons les thèses en présence, puis nous suggérons une tentative de réconciliation, après avoir analysé les déterminants classiques de la formation du prix (dont l'un, majeur, la disponibilité des ressources, fait par ailleurs l'objet d'un article de B. Weymuller dans ce même numéro des Annales des Mines).

### La formation du prix à long terme : le pétrole, ressource épuisable ?

De nombreux économistes ont interprété les prix du pétrole observés après le premier choc pétrolier comme intégrant une rente de rareté. Le caractère épuisable de la ressource pétrolière avait, en effet, été quelque peu oublié au cours des décennies précédentes, avec les grandes découvertes du Moyen-Orient et la croissance rapide de la production. En 1974, les économistes, à la suite à R. Solow, redécouvrent la loi d'Hotelling (voir l'article de Pierre-Noël Giraud, dans ce même numéro), selon laquelle la rente d'une ressource épuisable (c'est-à-dire son prix moins son coût marginal de production) doit croître, au cours du temps, à un taux égal au taux d'intérêt. La ressource épuisable correspondait alors au pétrole « conventionnel », les techniques de substitution envisagées alors n'apparaissant accessibles qu'à des coûts très nettement supérieurs aux prix pétroliers (et ce, jusqu'au milieu des années 1980). Les coûts de production étant faibles, le coût marginal pouvait être considéré comme négligeable ; on pouvait alors penser que c'était le prix du pétrole qui augmenterait, à un rythme égal au taux d'intérêt.

Aujourd'hui, ce n'est plus le cas. Comme l'indique B. Weymuller, il existe maintenant un *continuum* de ressources en hydrocarbures. Dans un contexte de variations des coûts rapides et de forte amplitude (avant une certaine correction, ils ont plus que doublé entre 2005 et 2008), nous nous limiterons ici à quelques ordres de grandeur. Les coûts de production des pétroles conventionnels (intégrant les dépenses d'exploration et les charges d'investissement) varient de quelques dollars par baril (pour le pétrole à terre extrait au Moyen-Orient) à une soixantaine de dollars le

baril (pour la production en mer profonde). Les huiles lourdes du Venezuela seraient rentables pour un prix du brut d'une cinquantaine de dollars, les sables bitumineux du Canada le seraient pour des prix allant de 70 à 80 dollars le baril, en fonction du coût affecté au traitement des émissions de gaz à effet de serre. Pour les carburants liquides produits à partir du gaz naturel (GTL) ou de charbon (CTL), les estimations de coût sont très variables (suivant les prix retenus pour la matière première, ainsi que pour le CO<sub>2</sub>). Les valeurs le plus couramment citées vont d'une cinquantaine de dollars par baril (pour le GTL) à une centaine (pour le CTL). Quant aux carburants issus de la biomasse, nous renvoyons à l'article de Nathalie Alazard-Toux, dans ce numéro de Responsabilité et Environnement.

En résumé, la courbe du coût marginal à long terme du pétrole, relativement régulière, porte sur des volumes de ressources potentiellement très importants. La rente perçue par les pays producteurs à bas coûts est donc aujourd'hui essentiellement une rente différentielle, plutôt qu'une rente de rareté d'Hotelling et elle devrait le rester, à moyen terme.

Remarquons, par ailleurs, que les coûts cités sont susceptibles d'évoluer en fonction non seulement du comportement de différents marchés (matières premières, services pétroliers, CO<sub>2</sub>...) mais aussi du progrès technique. Celui-ci, en permettant de découvrir et d'exploiter des gisements plus difficiles, d'améliorer les taux de récupération et de diminuer les coûts, a largement contribué à démentir les scénarios publiés au début des années 1980, qui – tous – prévoyaient des prix pétroliers à la hausse.

### Les aspects géopolitiques

Le pétrole est un bien stratégique tant pour les pays producteurs que pour les pays consommateurs. Les deux tiers des réserves mondiales de brut « conventionnel » sont situées au Moyen-Orient et 80 % des réserves mondiales prouvées sont détenues par des compagnies nationales. Les événements politiques ayant pour origine des questions pétrolières ou ayant des répercussions sur le marché pétrolier sont bien connus ; nous ne les détaillerons pas ici. La figure 1 présente un résumé de l'histoire des prix du brut, en relation avec certains de ces événements. La figure 2 met en

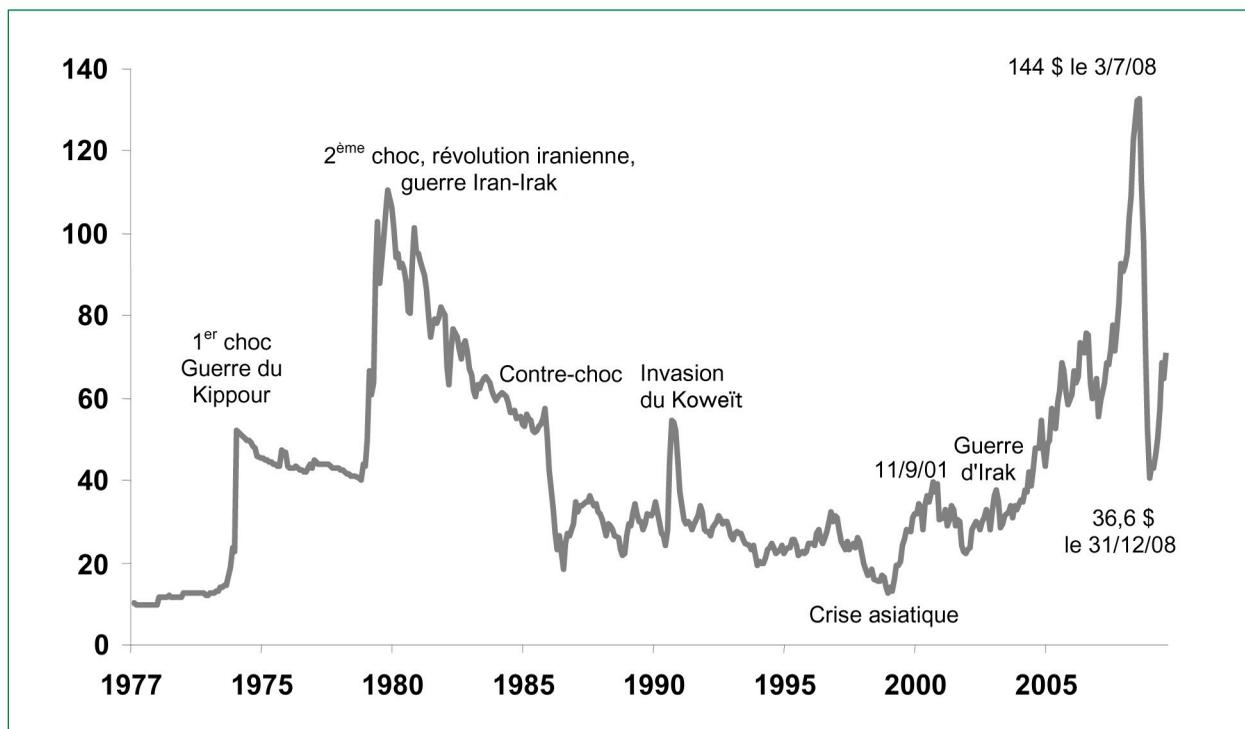


Figure 1 : Prix du Brent (moyenne mensuelle, dollars constants 2008).

évidence l'évolution de la volatilité des cours du pétrole brut. Sur ces deux graphiques, apparaissent également la crise asiatique de 1998 et la crise de 2008.

Par ailleurs (comme cela a été indiqué par B. Weymuller dans la section de son article consacré aux contraintes de capacité), dans les pays producteurs, les investissements par les compagnies nationales et l'ouverture (ou non) du domaine minier aux compagnies internationales sont le résultat de décisions politiques. Ceux de ces pays qui disposent des ressources les plus importantes doivent tenir compte non seulement de leurs intérêts économiques ou financiers proprement dits, mais aussi d'objectifs d'équité intergénérationnelle. Ils mettent également en avant leurs craintes que

n'apparaisse un « pic » de la demande généré par des politiques volontaristes de réduction des émissions de gaz carbonique dans l'atmosphère, susceptible de rendre inutiles de lourds investissements de développement.

### Le rôle de l'OPEP

Nombreuses sont les évolutions du prix du pétrole à avoir été interprétées comme ayant résulté d'un comportement de cartel (1) des pays de l'OPEP. L'Arabie Saoudite a toujours occupé une position dominante au sein de cette organisation. En dehors des périodes de chocs et de contre-chocs pétroliers, elle a joué un rôle de régulateur des prix en

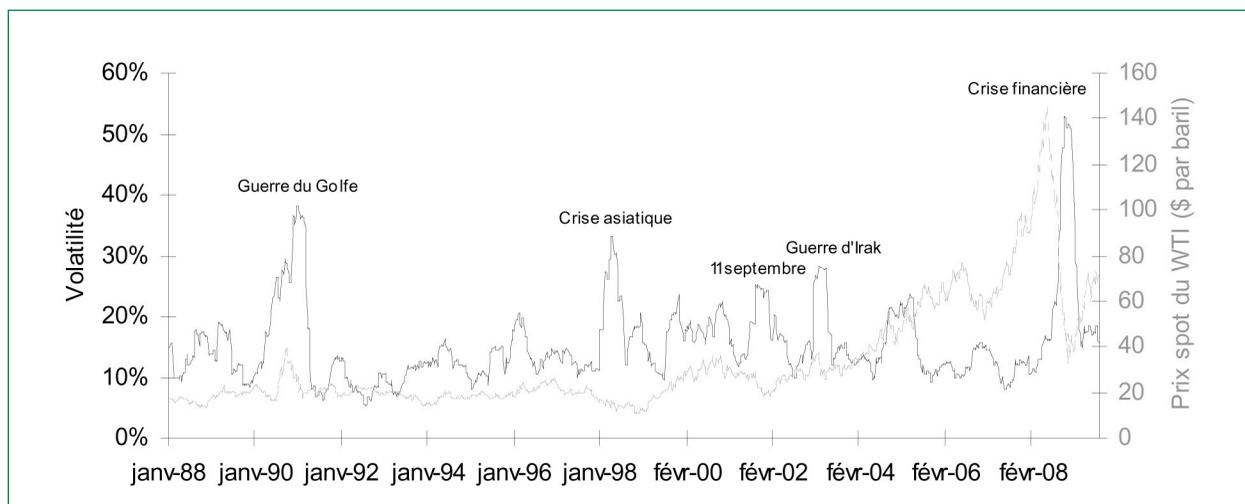


Figure 2 : Volatilité historique du prix spot du WTI.

Volatilité, en valeur annualisée, estimée sur période glissante centrée de 4 mois (sous une hypothèse de mouvement Brownien géométrique) à partir de cotations hebdomadaires.

acceptant d'être le principal producteur d'appoint. C'est ainsi qu'elle a accru ses livraisons en 1977-78, afin de les adapter à la demande. En 1979-80, en revanche, limitée par ses capacités de production, elle n'a pu faire face à l'augmentation de la demande, liée pour partie à des comportements de spéculation (suite à la révolution iranienne). Elle a donc « laissé filer » les prix. Pour les maintenir ensuite à leur nouveau niveau, elle a diminué sa production, de 1981 à 1985. En 1985, parvenue à son plancher (avec 2,5 Mb/j, contre 11 Mb/j en 1980), elle décide de restaurer ses parts de marché : c'est le début du contre-choc pétrolier et de la baisse des prix (cf. la figure 1).

### Le rôle joué par les investissements et les anticipations

#### *Les forces de rappel du marché*

Si le prix fixé par l'OPEP (période 1980-1985) ou par le marché est trop élevé, les forces de rappel, malgré une certaine inertie, retrouvent leur efficacité : substitutions, économies d'énergie, investissements en zones non-OPEP... De façon schématique, on observe, ici comme ailleurs, l'existence de cycles dans l'industrie pétrolière. Les capacités de



© Ali Haider/EPA-CORBIS

« Nombreuses sont les évolutions du prix du pétrole à avoir été interprétées comme ayant résulté d'un comportement de cartel des pays de l'OPEP ». Entrée du Marché financier de Dubaï, le 24 mars 2009.

Si l'Arabie Saoudite a assumé l'essentiel des réductions de production entre 1980 et 1985, elle s'est refusé à jouer seule ce rôle en 1998-99. Le délai nécessaire pour rallier ses partenaires de l'OPEP, ainsi que des pays producteurs non-OPEP (Norvège, Mexique, Russie), explique le temps qui s'est écoulé avant que les prix ne retrouvent un niveau pouvant être considéré comme satisfaisant. Elle a cependant montré ensuite, entre 2000 et 2003 – y compris durant la guerre en Irak –, qu'elle pouvait procéder à une gestion fine de la situation afin de maintenir les prix dans la fourchette (22 à 28 dollars le baril) que l'OPEP s'était fixée en mars 2000 ou, tout au moins, d'en défendre la borne inférieure. Toutefois, les possibilités de régulation disparaissent, lorsque les excédents de capacité de production sont insuffisants, comme cela a été le cas en 1979, puis de 2004 à 2008.

production sont parfois excédentaires, parfois saturées. Dans le premier cas, les prix subissent naturellement une pression à la baisse. C'est alors que l'OPEP peut intervenir, en limitant sa production. Lorsque l'on arrive à saturation des capacités de production, les prix augmentent, jusqu'à ce que ces capacités soient restaurées.

#### *Le rôle des anticipations*

Les décisions d'investissements s'appuient sur des hypothèses de demande et de prix à moyen et long terme. Mais les prévisions de prix sont toujours hasardeuses et, dans le domaine pétrolier, elles sont souvent « autodestructrices ». Un exemple particulièrement significatif est celui du contre-choc pétrolier de 1985. Jusqu'à celui-ci, toutes les prévisions évoquaient des prix du pétrole à la hausse. Certes, des déci-

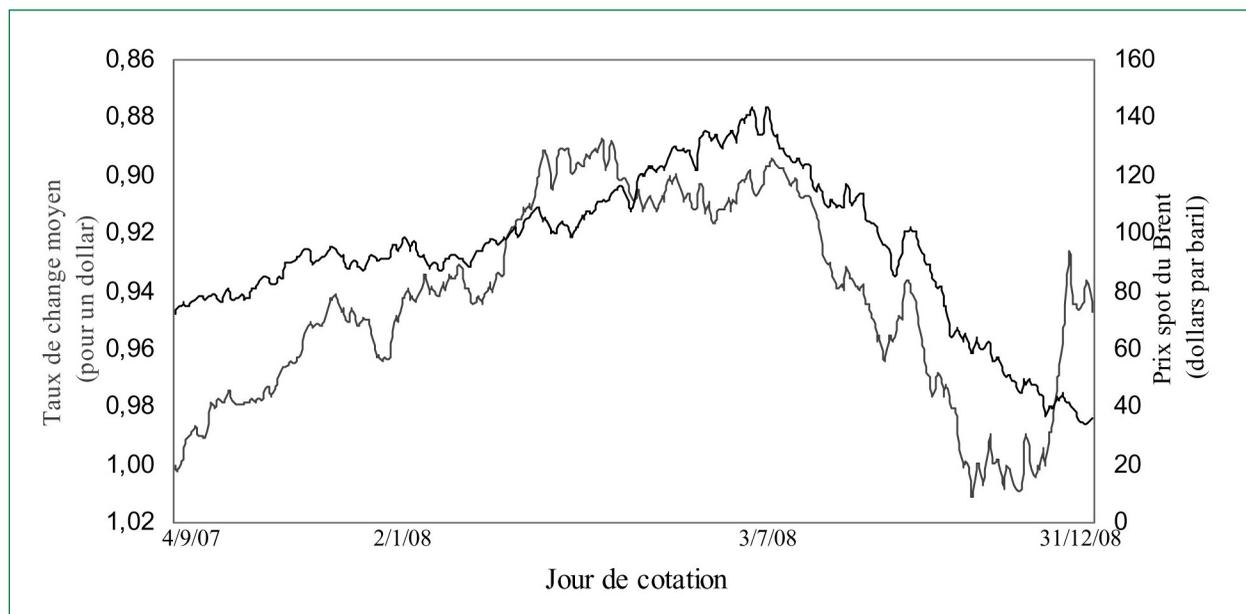


Figure 3 : Valeur du dollar et prix spot du Brent en données journalières.

sions politiques telles celles concernant le programme nucléaire français, avaient été prises dès le lendemain du premier choc pétrolier. Mais une partie importante des économies d'énergie, des substitutions, des efforts de recherche et développement et des investissements dans l'exploration et la production de pétroles « difficiles » en zones non-OPEP a été réalisée non seulement parce que le cours du brut était élevé, mais surtout parce qu'il était considéré improbable que le prix ne poursuivit pas sa croissance.

Les anticipations ont sans doute également joué un rôle dans l'enchaînement des événements ayant conduit à la situation de saturation des capacités de production et de raffinage apparue en 2004. Certes, le rythme d'augmentation de la demande, en particulier de la demande chinoise (depuis 2003), n'avait pas été prévu. En outre, jusqu'à l'été 2003, les analystes étaient quasi unanimes à prévoir un retour de l'Irak sur le marché, avec un développement de nouvelles capacités de production entraînant d'importants excédents de capacités au sein de l'OPEP. Un tel consensus était évidemment peu favorable à l'investissement dans ces pays, et cela a contribué à la disparition de ces excédents.

### La hausse de 2008 et le rôle des marchés financiers

La hausse des prix jusqu'en 2007 est le plus souvent interprétée comme le résultat de la saturation des capacités de production face à une demande croissante. Nous avons évoqué les anticipations mises en défaut. Parmi les freins aux investissements, il faut ajouter le manque d'ouverture du domaine minier (déjà évoqué), la remise en cause de certains contrats par les pays producteurs (entraînant des délais de développement) et la saturation du secteur parapétrolier.

En revanche, les raisons de la montée des prix en 2008, tout au moins au deuxième trimestre, font l'objet de controverses. Certains analystes l'attribuent à des compor-

tements de spéculation sur les marchés financiers. Le pétrole et les produits pétroliers font l'objet d'une cotation sur plusieurs marchés à terme (en particulier NYMEX et ICE) et de contrats de gré à gré, les transactions « papier » représentant plusieurs dizaines de fois celles conduisant à une livraison physique. Ces marchés sont utilisés par différents intervenants non industriels (fonds de pension, banques, fonds spéculatifs) pour des opérations de couverture, principalement contre l'inflation et une éventuelle baisse du cours du dollar.

### Valeur du dollar et prix du pétrole

Depuis quelques années, on observe une corrélation entre le prix du pétrole et le cours du dollar. La figure 3 illustre leurs évolutions entre septembre 2007 et décembre 2008. La valeur du dollar, telle qu'elle est perçue par la demande pétrolière non américaine, est ici approchée par la moyenne des taux de change de l'euro, du yuan, du yen et de la roupie indienne, pondérée par les quantités de pétrole consommées dans les régions correspondantes. Sur cette période, la valeur du dollar et le prix du pétrole ont un coefficient de corrélation de  $-0,79$  en niveau et de  $-0,43$  en variations relatives, sur une base journalière.

Plusieurs explications sont avancées. Le prix du pétrole est libellé en dollars. Les consommateurs réagissent, en revanche, au prix exprimé dans leur monnaie, de telle sorte qu'une dépréciation du dollar a pour effet de rendre le pétrole moins cher en devise locale. Il en résulte une demande supplémentaire, qui fait monter le prix. La causalité peut cependant jouer en sens inverse. Ainsi, une hausse du prix du pétrole provoque un accroissement du déficit commercial américain, ce qui conduit à une dépréciation du dollar.

La figure 3 suggère que l'évolution de la valeur du dollar a pu contribuer à la croissance du prix du pétrole jusqu'en mars 2008 et, dans les mêmes proportions, à la baisse

observée à partir d'août 2008. Les opérations de *traders* « jouant » la corrélation négative peut expliquer que celle-ci soit observée sur des données journalières. Une autre explication serait que la politique de change de certains pays producteurs informerait quotidiennement les marchés de devises sur l'état du déficit américain. Bien que l'interprétation de cette corrélation requière une certaine prudence, les marchés de devises semblent être sources de volatilité pour les marchés pétroliers.

### *Un scénario possible du rôle joué par la spéculation en 2008*

La hausse brutale du prix du pétrole observée en 2008 – elle-même suivie d'une chute, non moins spectaculaire, du

tisseurs financiers anticipent alors une dépréciation du dollar et une hausse de l'inflation (via une baisse des taux d'intérêt et l'injection de liquidités dans le système bancaire). Pour se couvrir contre ces risques, ils procèdent à des achats à terme massifs de matières premières. En juillet 2008, la crise des *subprimes* s'avère plus grave que prévu et, surtout, d'ampleur mondiale. Les investisseurs font face à un risque de déflation (lié à la récession qui s'annonce) et à une hausse du dollar (par un comportement d'aversion au risque des investisseurs, qui, en période de récession mondiale, se replie vers des actifs libellés en dollars). En outre, un retournement des fondamentaux du marché, lié à la récession, apparaît. Les investisseurs débouclent massivement leurs positions, ce qui entraîne une chute du prix des matières premières (le S&P GSCI Spot chute de 65 %, entre



© THE NEW YORK TIMES/REA

« L'évolution de la valeur du dollar a pu contribuer à la croissance du prix du pétrole jusqu'en mars 2008, et, dans les mêmes proportions à la baisse observée à partir d'août 2008. Les opérations de *traders* "jouant" la corrélation négative peut expliquer que celle-ci soit observée sur des données journalières ». *Traders* spécialisés dans les produits financiers dérivés liés au pétrole brut, Bourse de New York, le 9 juillet 2009.

prix – a été en grande partie attribuée par l'OPEP et certains responsables politiques et financiers, non pas aux fondamentaux du marché, mais aux positions spéculatives (longues) prises par des investisseurs financiers sur les marchés à terme. Ces analystes observent que cette hausse du prix du pétrole s'inscrit dans un contexte de hausse généralisée des prix des matières premières. Ainsi, l'indice S&P GSCI Spot croît de 85 % entre juillet 2007 et juillet 2008. De façon très schématique, cette hausse trouverait elle-même en grande partie son origine dans la crise des *subprimes*, qui débute en juillet 2007 aux Etats-Unis. Les inves-

juillet 2008 et janvier 2009) et un retour du marché vers ses nouveaux fondamentaux. Pour le pétrole, ces fondamentaux sont caractérisés par l'apparition d'excédents de capacité de production consécutifs à la baisse de la demande, elle-même liée à la crise économique. Selon cette interprétation, la « bulle » observée relève d'un comportement rationnel (diversification de portefeuilles et couverture de risques) : l'envolée des prix à terme, observée jusqu'à la mi-2008, s'est naturellement transmise au prix du pétrole physique, puisque l'essentiel des transactions commerciales est réalisé sur la base d'une indexation sur des prix à terme.

### Le stockage, nécessaire signature de la spéculation?

Indéniablement, il existe sur les marchés à terme un équilibre financier caractérisé par l'absence d'opportunités d'arbitrage, qui limite à une poignée de dollars l'écart entre prix spot et prix à terme. Le pétrole est cependant un bien de consommation dont le prix, à l'équilibre économique, résulte de la rencontre d'une offre et d'une demande physique. En conséquence, différents économistes, dont P. Krugman (2), contestent l'analyse précédente. Selon eux, un prix supérieur (du fait de la spéculation) à celui que déterminent les fondamentaux implique nécessairement la constitution d'un stock (physique). Celui-ci sert, en effet, de variable d'ajustement permettant la coexistence de l'équilibre financier (relation de non-arbitrage entre prix spot et prix à terme) avec l'équilibre économique (prix résultant d'un équilibre entre l'offre et la demande mondiale). La figure 4 illustre une situation de ce type : si le prix à terme conduit (par équilibre financier) à un prix spot supérieur au prix correspondant aux fondamentaux du marché, il en résulte la constitution d'un stock (assurant l'équilibre économique). Plus l'élasticité de la demande est élevée (c'est-à-dire, moins forte est la pente de la courbe de demande, sur la figure 4), plus la quantité devant être stockée est importante. Or, l'élasticité de la demande pétrolière mondiale au prix, bien que faible à court terme, n'est pas nulle. Il faut, en outre, une augmentation continue, et non pas simplement ponctuelle, du niveau des stocks pour que le prix à la pompe se maintienne au-dessus du prix correspondant aux fondamentaux du marché. Selon de nombreux économistes, en l'absence de la constitution de stocks, la spéculation ne peut pas avoir d'impact sur les marchés physiques, même si elle a été montrée du doigt à plusieurs reprises, ces dernières années (sans qu'il y ait nécessairement eu accroissement des stocks).

### Une tentative de réconciliation

Nous proposons une approche – simple (mais inédite, à notre connaissance) –, qui suggère que la spéculation peut

(tout au moins, temporairement) faire monter le prix du pétrole au-dessus de ses fondamentaux sans qu'un accroissement important des stocks soit nécessairement observé. Les réponses de la demande aux variations de prix sont caractérisées par des élasticités, qu'il est difficile d'estimer. Une valeur couramment citée est de  $-0,05$  pour l'élasticité à court terme, au niveau mondial.

Parmi les facteurs explicatifs de cette faible sensibilité de la demande figurent non seulement la difficulté de substituer les produits pétroliers dans le secteur des transports, mais aussi le fait que, dans de nombreux pays, le signal prix est masqué soit par des subventions, soit par des taxes sur les carburants indépendantes du prix du brut. L'élasticité à long terme est plus élevée, de l'ordre de  $-0,2$  à  $-0,3$ , car elle tient compte de l'adaptation des équipements au prix du pétrole.

Pour P. Krugman, imputer une hausse des prix à la spéculation dans les cas où il n'y a pas de constitution de stocks, c'est nier l'existence d'une courbe de demande. Mais, de même que l'élasticité à court terme est inférieure à l'élasticité à long terme, il semble plausible que l'élasticité à très court terme soit très inférieure à celle de court terme du fait de différentes rigidités : inerties du prix des produits raffinés, habitudes, déplacements programmés...

Par conséquent, si, du fait de la spéculation, le prix du pétrole passe à une valeur supérieure à celle correspondant aux fondamentaux du marché, ce n'est que progressivement que la demande mondiale s'adaptera à ce nouveau prix. En théorie, à horizon infini, la demande devrait tendre asymptotiquement vers sa valeur définie par l'élasticité de long terme. Par analogie avec la représentation de certains processus de diffusion, on peut imaginer une réaction de la demande schématisée au moyen d'une courbe en S semblable à celle de la figure 5. Sur cette dernière, l'évolution de la demande mondiale journalière est calibrée selon une courbe de Gompertz en considérant une élasticité-prix de la demande mondiale de pétrole (mesurée en données annuelles) égale à  $-0,05$  sur le court terme et à  $-0,21$  sur le long terme (cf. [3]). On suppose qu'à la date 0, le prix passe (et reste ensuite) à une valeur supérieure de 20 % à celle

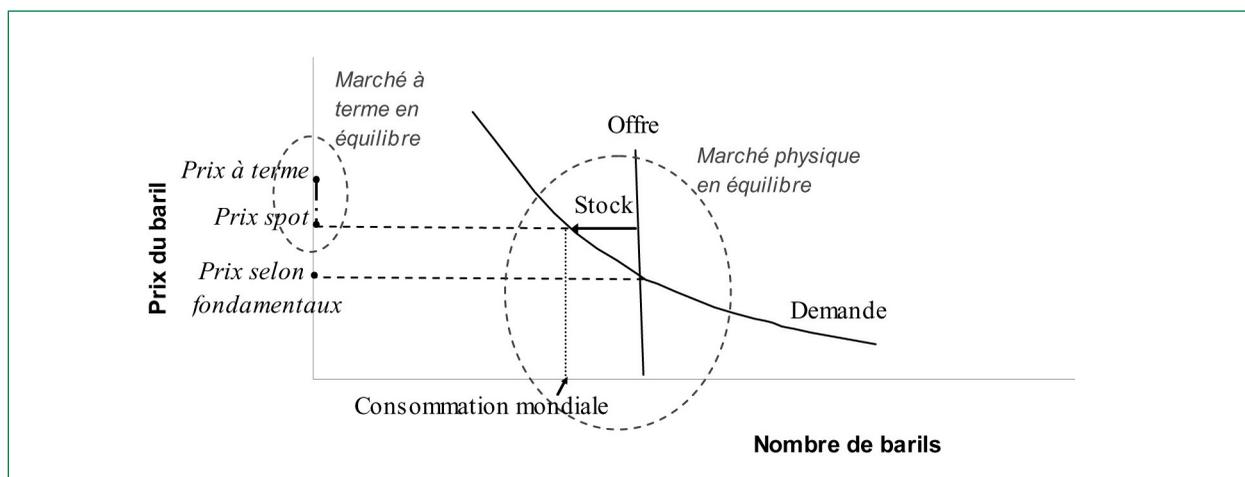


Figure 4 : Le stockage, variable d'ajustement entre équilibres financier et économique.

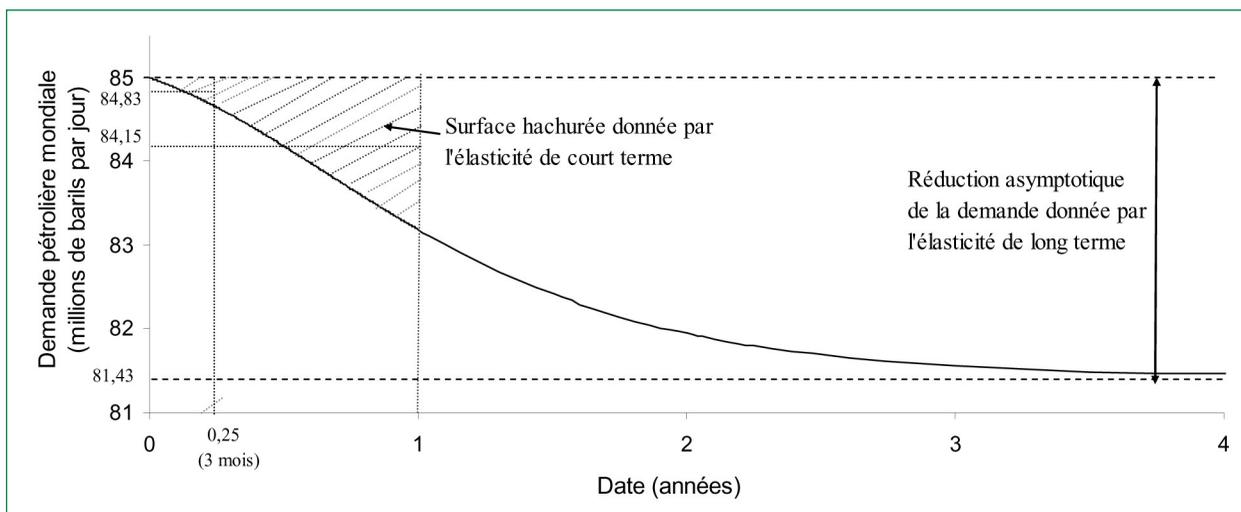


Figure 5 : Ajustement de la demande journalière à un prix supérieur de 20 % à la valeur donnée par les fondamentaux du marché.

correspondant aux fondamentaux du marché, la demande initiale correspondante étant de 85 millions de barils par jour. La réduction de la demande à long terme (3,57 millions de barils par jour) définit l'asymptote de la courbe. La réduction de la demande, la première année, de 0,85 Mb/j en moyenne annuelle, donne la surface hachurée (3).

Toutes choses étant égales par ailleurs, l'accroissement des stocks mondiaux résultant de l'analyse du paragraphe précédent sera chaque jour un peu plus important et, à une date infinie, il tendra vers la différence entre la demande initiale et celle déterminée par l'élasticité de long terme. Il sera de 0,85 Mb/j en moyenne la première année, mais seulement de 0,17 Mb/j en moyenne durant le premier trimestre. En conséquence, si, au bout de trois mois, le prix revient à une valeur définie par de nouveaux fondamentaux, seule une augmentation très modérée des stocks aura été observée et la « signature de la spéculation par les stocks » aura été difficilement lisible.

### Les évolutions possibles

Sans prétendre proposer des prévisions (les prévisions effectuées dans le passé ayant été le plus souvent prises en défaut), nous nous limiterons ici à quelques éléments d'analyse.

Le principal déterminant de la demande pétrolière est la croissance économique. L'élasticité de la demande au PIB est, en général, de l'ordre de 1 dans les pays émergents et elle est inférieure à 1 (de l'ordre de 0,2 à 0,4) dans les pays industrialisés, où l'intensité énergétique décroît régulièrement depuis de nombreuses décennies. Les évolutions à venir dépendront de la croissance économique et des politiques mises en œuvre pour lutter contre les émissions de gaz à effet de serre.

Dans la plupart des scénarios, la croissance annuelle de la demande pétrolière se situe entre 1 et 1,5 % au cours des deux prochaines décennies.

Aujourd'hui, avec la crise et l'arrivée à leur terme de différents projets de développement qui avaient été retardés,

la scène pétrolière se caractérise par des excédents de capacité de production (de l'ordre de 6 Mb/j). A court terme, sauf accident géopolitique majeur (lié, par exemple, au nucléaire iranien), une forte hausse des prix est donc considérée comme peu probable. Une légère hausse est anticipée par la plupart des analystes pour tenir compte de la résorption des surcapacités prévisible d'ici à quelques années. Une certaine érosion des prix, limitée par le jeu de l'OPEP si besoin, est cependant tout à fait possible.

Au-delà de quelques années, la demande risque de se heurter au plafonnement des productions cité par B. Weymuller, ce qui devrait se traduire par une hausse significative des prix. Ainsi, l'AIE évoque dans son scénario de référence un prix de 115 \$/b pour le pétrole, en 2030. Des scénarios de prix bas ne sont pas totalement à exclure, même s'ils paraissent aujourd'hui peu probables. Ils pourraient résulter d'une croissance mondiale lente ou de la mise en place de politiques très volontaristes de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ils supposeraient de très importants changements de comportement, des investissements lourds dans tous les secteurs de l'énergie : efficacité énergétique, capacités de production pétrolière, énergies renouvelables et nucléaire. Parmi d'autres facteurs conduisant à une baisse des prix à long terme, il faut naturellement citer de bonnes surprises de la géologie (découverte d'importantes réserves d'hydrocarbures profondément enfouies, par exemple) ou bien d'avancées technologiques majeures, difficiles à anticiper (par exemple, fortes améliorations des taux de récupération développement des véhicules électriques).

Un scénario paraissant assez vraisemblable est celui d'un nouveau choc à venir, semblable à celui de 1979-80. La montée des prix de ces dernières années, comme celle de 1973, a mis en évidence la nécessité, pour les pays consommateurs, de prendre des mesures. Celles qui ont été prises risquent d'être très insuffisantes, si la demande reprend sa progression. Avant que les prix ne retrouvent un nouvel équilibre de long terme (par exemple, aux environs d'une centaine de dollars par baril, voire 120 dollars (en dollars

d'aujourd'hui), il est fort possible que les prix dépassent largement le niveau des 200 \$/b nécessaires pour que les investissements soient réalisés tant du côté de l'offre que du côté de la demande.

Pour éviter cela et rendre possible une transition douce, il faudrait que le scénario d'un nouveau choc, pénalisant pour tous les acteurs, soit considéré comme inévitable. Rappelons, en effet, le rôle des anticipations et rappelons aussi à quel point les prévisions peuvent être autodestructrices, dans l'industrie pétrolière. Bref, le facteur le plus efficace permettant d'éviter ce choc serait l'apparition d'un consensus autour de la date de sa venue. Cela inciterait l'ensemble des acteurs à prendre les décisions idoines en temps utile, les opérateurs industriels à investir et les gouvernements à prendre les mesures nécessaires.

### Notes

\* Professeur associé, IFP School.

\*\* Economiste, IFP, axel.pierru@ifp.fr

(1) Plus précisément, d'un oligopole dominant, avec frange concurrentielle (cf. [1]).

(2) Paul Krugman, prix Nobel d'économie : « *The oil nonbubble* », 2008, <http://www.nytimes.com/2008/05/12/opinion/12krugman.html>.

(3) Nous supposons ici que l'élasticité de  $-0,05$  donne la variation de la demande de la première année en moyenne annuelle, soit :  $0,05 \times 0,2 \times 85 = 0,85$  Mb/j.

### Bibliographie

[1] GIRAUD (P. N.), The Equilibrium Price Range of Oil – Economics, Politics and Uncertainty in the formation of oil prices, *Energy Policy*, Vol. 23, n° 1, 1995.

[2] Agence Internationale de l'Énergie, « World Energy Outlook 2009 », IEA Publications, Paris, 2009.

[3] HAMILTON (J.), « Understanding crude oil prices », *Energy Journal*, Vol. 30, n°2, 2009.

## Le gaz naturel : une énergie d'avenir

La production d'électricité devrait contribuer pour une part essentielle à la croissance de la consommation de gaz naturel dans le monde, quelle que soit la région considérée, à l'image de la progression observée au cours des trente dernières années. Les maillons transport, stockage et distribution de gaz naturel représentent cependant, en moyenne, de l'ordre de 70 % du coût total de la chaîne gazière.

par Jean-Marie DAUGER\*

### Le gaz naturel : une énergie encore récente dans le mix énergétique mondial

Le gaz naturel est l'énergie fossile dont la valorisation est la plus récente dans l'histoire industrielle. Sa part dans le mix des énergies primaires n'a fait que croître au cours des dernières décennies, jusqu'à s'établir aujourd'hui à plus de 20 % (cf. les figures 1 et 2).

### La production d'électricité : un usage porteur

Au cours de son essor, le gaz naturel n'a pas connu d'usage dit protégé, où ses qualités le mettraient à l'abri des énergies concurrentes comme c'est actuellement le cas des produits pétroliers, dans le secteur des transports.

Le gaz naturel a donc dû, pour se développer, justifier de son intérêt économique, de ses qualités environnementales, de ses facilités d'utilisation, pour devenir le principal combustible utilisé (hors secteur des transports) dans les secteurs résidentiel, commercial et industriel.

Ainsi, la part du gaz naturel n'a cessé d'augmenter au cours des trente dernières années sur tous les segments de clientèle (cf. la figure 3).

Si on peut s'attendre sur les marchés matures à un tassement de la croissance de la consommation de gaz naturel des clients finaux du fait des politiques de maîtrise de l'énergie, la production d'électricité devrait continuer à constituer un débouché en croissance accélérée, à l'image de la progression observée au cours des 30 dernières années (cf. la figure 4).

Les centrales de production d'électricité à partir de gaz naturel présentent l'avantage de nécessiter un investissement unitaire moindre que les autres filières, d'être plus rapides à construire et d'une exploitation particulièrement souple. Leurs rendements, en progression constante, atteignent des niveaux élevés (58 %, pour les turbines à gaz à cycles combinés) et ce, avec des émissions de CO<sub>2</sub> réduites.

Dans un univers de plus en plus sensible aux impacts environnementaux et où les contraintes réglementaires restent encore peu prédictibles sur le moyen terme, la produc-

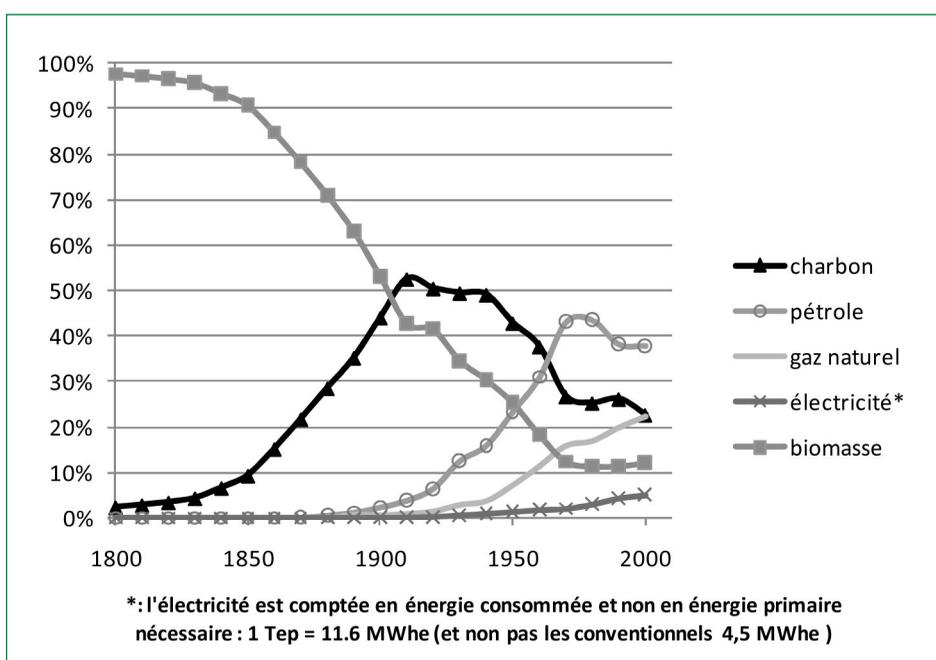
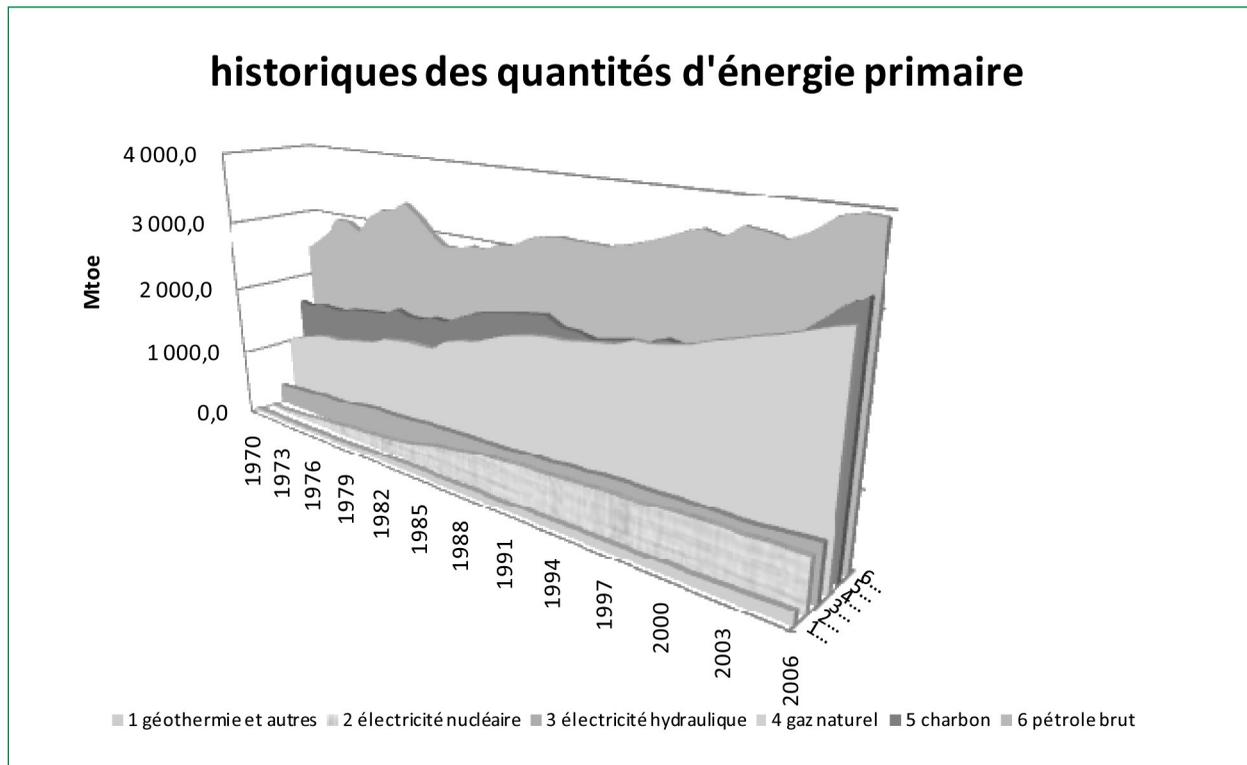


Figure 1 : Evolution de la consommation mondiale (1800-2000) des sources d'énergie (in L'Énergie de demain, de J.L. Bobin, E. Huffer et H. Nifenecker).



**Figure 2 :** Production mondiale des énergies primaires au cours des trente-cinq dernières années (*Energy Information Administration*).

secteur	consommation par type d'énergie des pays de l'OCDE					
	industrie		commercial		résidentiel	
	1974	2007	1974	2007	1974	2007
pétrole	32%	15%	42%	13%	34%	13%
gaz naturel	27%	<b>29%</b>	27%	<b>31%</b>	30%	<b>39%</b>
charbon	19%	13%	6%	1%	13%	2%
combustibles renouvelables et déchets	4%	8%	0%	1%	4%	7%
électricité	17%	31%	24%	53%	18%	36%
chaleur	1%	3%	0%	2%	2%	2%
autre	0%	0%	0%	0%	0%	1%
total (Mtoe)	922	842	273	462	520	675

**Figure 3 :** Parts des différentes énergies par segment de consommateurs (pays OCDE).

tion d'électricité à partir de gaz naturel est, de plus en plus souvent, le meilleur compromis possible.

### **Le gaz naturel : des qualités précieuses pour la gestion des contraintes environnementales de long terme**

De par sa composition chimique (essentiellement du méthane, dont la molécule possède plus d'atomes d'hydrogène par atome de carbone que n'importe quel autre hydrocarbure), la combustion du gaz naturel est facile à réguler (peu de gaz issus d'une combustion imparfaite, utilisation possible dans les turbines) ; elle ne génère pas d'oxyde de soufre et produit par unité d'énergie, parmi tous les combustibles fossiles, la plus faible quantité de CO<sub>2</sub>. Dans une combustion simple (installation de chauffage), les émissions

de CO<sub>2</sub> se comparent comme l'indique le tableau suivant (cf. la figure 5).

Pour le chauffage des bâtiments et des logements, les installations fonctionnant au gaz naturel émettent également moins de CO<sub>2</sub> que les moyens de production d'électricité mis en œuvre pour répondre aux besoins d'un chauffage électrique équivalent.

Pour la production d'électricité, la réduction des émissions de gaz à effet de serre émis par la combustion du gaz naturel est démultipliée par le rendement élevé des centrales de production à cycle combiné à gaz (atteignant jusqu'à 58 %), qui est bien supérieur à celui des centrales à charbon ou à fioul.

Compte tenu des possibilités de stockage, le gaz naturel peut être associé aux énergies renouvelables (solaire, éolien...). Les installations de production d'électricité à par-

	1974	2007
pétrole	23%	6%
gaz naturel	12%	21%
charbon	37%	42%
nucléaire	4%	14%
hydraulique	23%	16%
autre	1%	3%
total (TWh)	6272	19771

Figure 4 : Parts de différentes énergies primaires dans la production mondiale d'électricité (IEA Scoreboard 2009).

	Kg CO2/tep (PCI)
Gaz naturel	2394 soit 2154 Kg CO2/tep(PCS)
GPL	2688
Essence	3066
Kérosène	3108
Gazole /FOD	3150
Fioul lourd	3276
Charbon	3990

Figure 5 : Les émissions de CO2 des principaux combustibles (Source : ADEME).

tir de gaz naturel pourront être accompagnées, dans le futur, de systèmes de capture du carbone avec une efficacité supérieure à celle qui est possible avec les autres énergies fossiles (grâce au rendement élevé des centrales au gaz naturel et au volume plus faible du CO<sub>2</sub> à stocker).

Les politiques énergétiques, comme les réglementations, devraient donc tirer les conséquences des avantages environnementaux du gaz naturel. Il n'en est pas toujours ainsi, le gaz naturel étant souvent assimilé aux autres combustibles fossiles. Par ailleurs, l'absence de taxation « carbone » de l'électricité au stade de son utilisation finale ne traduit pas non plus la réalité des émissions de CO<sub>2</sub> de la production d'électricité alimentant le chauffage électrique.

### Une énergie incontournable au cours des prochaines décennies

Notons tout d'abord que, même dans le scénario de l'AIE (Agence Internationale de l'Energie) limitant le réchauffement climatique à 2°C, la satisfaction des besoins mondiaux en énergie nécessite le recours aux énergies carbonées. Un déploiement accéléré des énergies renouvelables dans la production d'électricité et la mise en œuvre de politiques volontaristes de maîtrise de l'énergie nécessiteraient, dans les conditions de ce scénario, de recourir, en 2030 encore, aux énergies fossiles et ce, à hauteur de 70 % de la demande d'énergie primaire (voire, de 80 %, dans le scénario de référence).

Tirant parti des atouts environnementaux du gaz naturel, le scénario de l'AIE continue de lui attribuer plus de 20 % des besoins d'énergie primaire au cours de la première

moitié du XXI<sup>e</sup> siècle. Dans les deux scénarios de l'AIE, la consommation de gaz sera plus importante en 2030 qu'en 2007.

La production d'électricité devrait contribuer, à elle seule, à plus de 45 % du développement du gaz naturel (cf. la figure 6).

### La répartition de la consommation dans le monde et ses évolutions

#### Marchés matures et marchés émergents.

Même si les marchés matures (Europe et Amérique du Nord) resteront les principaux consommateurs de gaz naturel à l'horizon 2030, ils connaîtront une croissance limitée, voire nulle (scénario 450), sur la période 2007-2030.

Les croissances les plus fortes devraient être observées au Moyen-Orient (favorisé par la disponibilité de la ressource), en Chine (sous l'effet d'une forte croissance économique) et en Amérique du Sud.

La production d'électricité devrait contribuer pour une part essentielle à la croissance de la consommation de gaz naturel dans le monde, quelle que soit la région considérée (cf. la figure 7).

### Les réserves de gaz : plus de 60 ans de consommation

Les réserves de gaz naturel sont abondantes, avec un ratio *Réserves prouvées/Production* du gaz naturel plus important que celui du pétrole (60,4 années, pour le gaz naturel, et 42 années, pour le pétrole). Toutefois, ces réserves se trouvent concentrées dans un nombre limité de pays :

- ✓ la Russie, l'Iran et le Qatar détiennent 53 % des réserves de gaz naturel ;
- ✓ le Moyen-Orient (y compris le Qatar) détient, à lui seul, 41 % des réserves de gaz naturel.

Ces réserves pourraient être doublées en tenant compte du potentiel des gaz dits non-conventionnels (il s'agit de gaz renfermés dans une couche de roche, qui peut être soit du schiste (*shale gas*), soit de la houille (*coalbed methane*), soit du sable compact (*tight gas*).

### Le rôle croissant des compagnies d'Etat dans la production de gaz naturel

Dans l'essentiel des pays de l'OCDE (en particulier en Amérique du Nord et en Europe, les réserves de gaz naturel

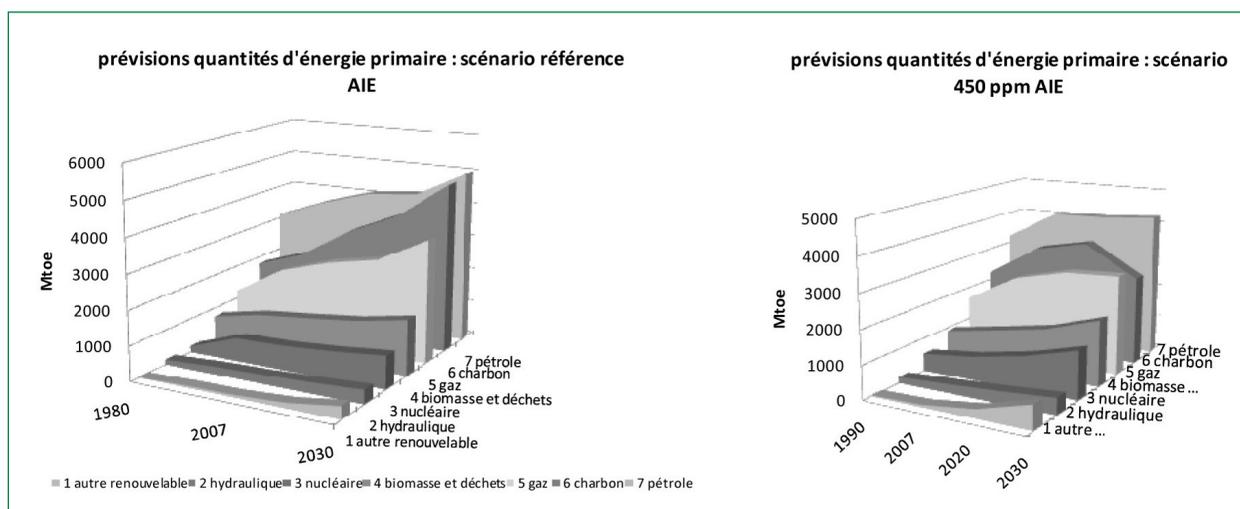


Figure 6 : Prévisions de la production d'énergie primaire pour les deux scénarios de l'AIE.

(comme celles de pétrole) sont exploitées par des compagnies privées, notamment par les IOC (*International Oil Companies*).

En revanche, dans la plus grande partie des pays hors OCDE (en particulier en Russie et au Moyen-Orient), ces réserves sont actuellement très majoritairement contrôlées et exploitées par des compagnies d'Etat, les NOC (*National Oil Companies*).

L'essentiel des réserves se situant dans des pays hors OCDE, les NOC détiennent à présent plus de 90 % des réserves de pétrole et de gaz dans le monde, alors qu'elles n'en détenaient que 15 % dans les années 1970. Pour pérenniser leur accès aux réserves, les IOC s'orientent souvent vers des partenariats avec les NOC en tirant parti de leurs capacités à maîtriser des techniques de pointe et à faire preuve d'innovation.

La coopération entre compagnies privées et compagnies nationales sera un facteur clé pour ajuster les mises en production des réserves à la croissance de la demande de gaz naturel et investir au juste moment.

Tant l'Europe que l'Asie du Sud-Est dépendent, pour leurs importations, d'un petit nombre de pays producteurs majeurs (Russie, Algérie, Qatar, pour l'Europe, Indonésie, Brunei, Qatar et, bientôt, l'Australie, pour l'Asie).

Le GECF (*Gaz Exporting Countries Forum*), organisation regroupant les grands pays producteurs de gaz, s'est mis en place au cours des dernières années. Depuis la chute récente des prix sur les marchés, il cherche à s'organiser afin de mieux maîtriser les niveaux de prix du gaz. La diversité des marchés gaziers et la divergence des intérêts rendent improbables la transformation du GECF en un cartel analogue à l'OPEP.

### L'économie du gaz naturel se distingue de celle du pétrole par des coûts de transport, de stockage et de distribution plus élevés

Les maillons transport, stockage et distribution de gaz naturel représentent, en moyenne, de l'ordre de 70 % du coût total de la chaîne gazière :

- ✓ alors que pour le pétrole, le coût de transport n'intervient que pour moins de 5 % du prix final, pour le gaz naturel, celui-ci représente environ 20 % du coût du gaz livré à la frontière du pays de consommation ;
- ✓ le coût du stockage permettant d'assurer la couverture du pic hivernal de la demande représente environ 10 % du prix du gaz livré ;
- ✓ pour les petits clients (particuliers, commerces), les coûts de distribution et de commercialisation représentent environ 40 % du prix du gaz livré au compteur (cf. le tableau 1).

Du point de vue économique, le transport de gaz naturel liquéfié (GNL) présente un coût d'investissement initial (essentiellement pour la construction de l'unité de liquéfaction) nettement plus élevé que la construction d'un gazoduc ; il ne devient plus intéressant que ce dernier qu'à la condition que les distances à parcourir soient supérieures à 2 000 km.

Au-delà de cet aspect économique, le GNL présente souvent des atouts complémentaires :

- ✓ il permet d'éviter les problèmes politiques liés au passage des gazoducs à travers le territoire de pays tiers (cf. la crise russo-ukrainienne) ;
- ✓ il permet de modifier les destinations du GNL produit par une unité de liquéfaction donnée, qui est ainsi en mesure d'aller chercher les zones de consommation les plus rémunératrices.

### Le développement des flux de gaz naturel entre les régions du monde : le rôle clé du GNL

#### *Un commerce intra-régional et interrégional*

Du fait de son coût de transport, le commerce de gaz naturel a d'abord porté sur des distances limitées. Il s'est peu à peu développé au sein des grandes régions économiques (Amérique du Nord, Europe, Asie, Amérique du Sud), puis, d'une manière encore limitée, entre grandes régions du monde (Bassin Atlantique, Bassin Pacifique).

	Pétrole	Gaz naturel	Électricité
<b>Transport</b>	facile (tankers) : peu coûteux → commerce mondial	possible (coûteux) → commerce par continent	difficile (non-rentable si l'on dépasse quelques centaines de km) → commerce par pays
<b>Stockage</b>	facile stockage fait chez les utilisateurs finaux	stockage souterrain possible à grande échelle (avant distribution), si la géologie le permet	très difficile énergie de réseau
<b>Distribution</b>	transport routier + réseau limité de points de vente	réseau avec un point de livraison par client (investissement initial important, coût de maintenance)	réseau (idem que pour le gaz)

**Tableau 1** : En matière de transport, de stockage et de distribution, le gaz naturel occupe une position intermédiaire entre le pétrole et l'électricité.

Selon *Cedigaz*, le commerce international de gaz a représenté 31,7 % de la production commercialisée en 2008 (à comparer à 13,5 % en 1985).

Le GNL joue un rôle essentiel dans la mondialisation des échanges. Le commerce du GNL a quasiment doublé en 20 ans, pour atteindre 7,4 % des volumes de gaz commercialisés en 2008. Il a représenté 13 % des échanges interrégionaux en 2007 et il pourrait atteindre 26 % de ces échanges en 2030, selon le scénario de référence de l'Agence Internationale de l'Énergie.

L'essentiel du commerce de GNL est basé sur des contrats à long terme (LT). Toutefois, une part croissante (1/5<sup>e</sup>, en 2007) fait l'objet de transactions de court terme établies sur la base d'arbitrages entre destinations, en fonction des prix.

Toutefois, si la part du commerce international augmente, la situation en matière d'importations peut être très contrastée : les États-Unis, la Russie et l'Iran sont les plus grands producteurs, mais aussi les plus gros consommateurs de gaz.

L'Europe et l'Asie (OCDE) sont dans une situation inverse :

- ✓ l'Europe (OCDE) et l'Asie (OCDE) sont déjà très dépendantes des importations (plus de 50 % de la demande européenne doivent être couverts en recourant aux importations) et cette dépendance va s'accroître au cours des décennies à venir ;

- ✓ l'essentiel des besoins de l'Europe devrait être couvert par l'accroissement des importations en provenance de la Russie, de l'Afrique du Nord, de la zone caspienne et du Moyen-Orient.

### Une question de court terme : les surcapacités de production

Pour faire face à la croissance de la demande constatée (et prévue) avant la crise financière de 2008, d'importants investissements ont été engagés dans la production de GNL (notamment par le Qatar) et dans la production de gaz naturel (particulièrement dans celle de gaz non-conventionnel aux États-Unis).

Ces capacités de production arrivent sur le marché au moment où survient la pire crise économique que le monde ait connue depuis 1929, entraînant avec elle une

réduction historique de la demande d'énergie, et en particulier de gaz naturel (-3 % en 2009 par rapport à 2008, dans le monde).

Ainsi, on peut estimer qu'il existe une surcapacité potentielle de production de gaz (1) naturel d'environ 100 milliards de mètres-cubes/an (bcm/an), pour les deux années 2010 et 2011.

La réduction de la demande résultant de cette surcapacité potentielle a entraîné une baisse des prix sur les marchés du gaz. Les prix constatés sur les marchés (Amérique du Nord, places européennes, prix spot du GNL) remonteront, une fois que cette « bulle de gaz » aura été réduite.

Le retour de la croissance de la demande (notamment des pays émergents) et le déclin naturel des champs gaziers actuellement en production devraient conduire rapidement à la résorption de ces surcapacités de production.

### Les problèmes structurels du marché du gaz naturel

*Le type d'échange entre producteurs et consommateurs : des contrats LT indexés sur les produits pétroliers, en Asie et sur le continent européen VS des marchés de court terme, sur les marchés nord-américain et britannique.*

Trois types d'organisation des marchés du gaz coexistent : le marché nord-américain (avec celui du Royaume-Uni), le marché européen continental et le marché asiatique :

- ✓ Le marché nord-américain se caractérise par une quasi-autosuffisance et une faible concentration de l'offre assurée par plusieurs milliers de producteurs de gaz naturel approvisionnant un marché mature et déjà largement interconnecté (dont les besoins d'investissements en nouvelles infrastructures sont, par conséquent, faibles). De ce fait, l'offre peut facilement être mise en concurrence sur une base court terme et les échanges se font par le biais de marchés organisés « liquides », sur des échéances réduites (de 1 à 3 ans) ;

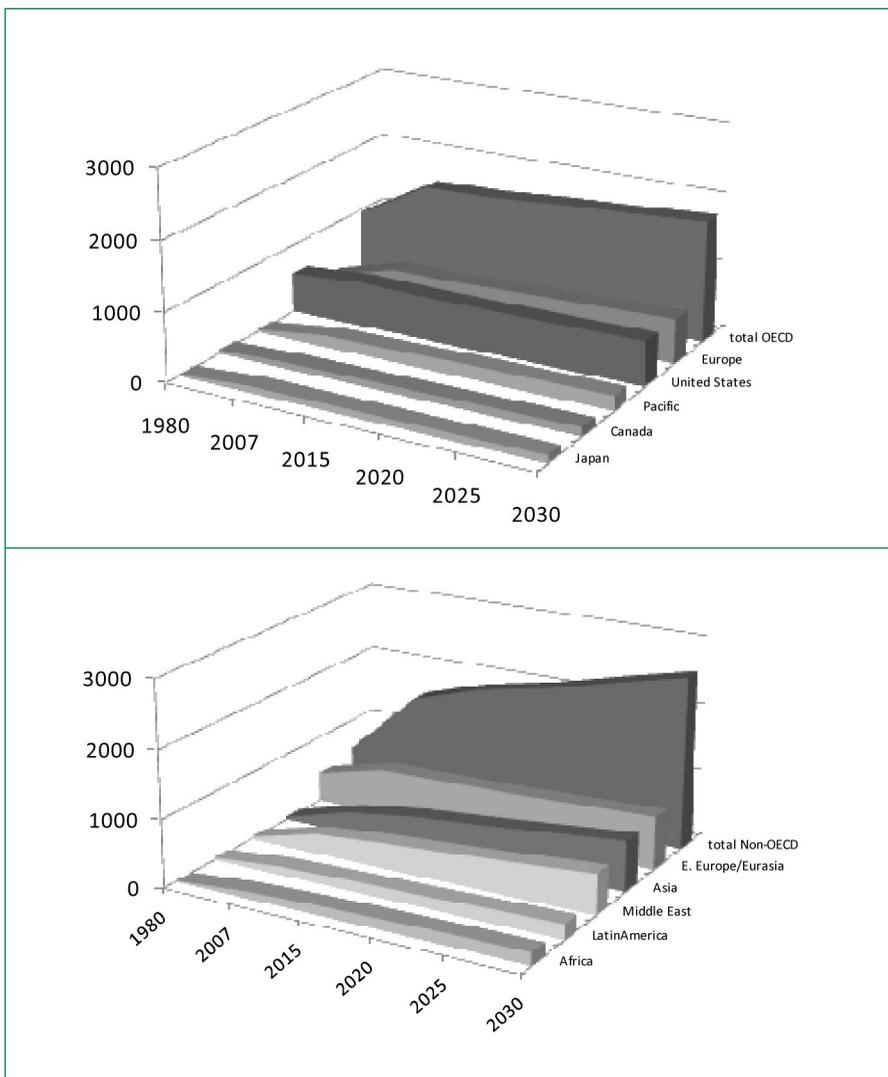


Figure 7 : Prévisions de consommation de gaz naturel (en bcm) par région (AIE scénario de référence).

- ✓ Le marché européen importe 50 % de sa consommation d'un nombre limité de pays producteurs (la Russie fournissant la moitié des importations européennes) et il devra encore augmenter ses importations au fur et à mesure que sa production intérieure déclinera.

L'approvisionnement en gaz naturel du continent européen repose à 80 % sur des contrats de long terme (atteignant parfois les 20 ans) indexés sur les produits pétroliers et négociés sur la base d'une référence à la quantité accessible sur les marchés visés. Ces contrats apparaissent encore nécessaires afin de disposer d'une sécurité d'approvisionnement à long terme, d'équilibrer les pouvoirs de marché des pays exportateurs et de financer la construction de nouvelles chaînes d'approvisionnement. Ils constituent un partage des risques entre l'exportateur (qui se voit assuré d'un débouché pour sa production) et l'importateur (qui acquitte un prix compétitif par rapport aux énergies alternatives).

Les marchés organisés de court terme sont en cours de développement en différents nœuds européens, mais ils sont restés des marchés d'équilibrage au cours des dernières années.

- ✓ Le marché asiatique, essentiellement centré sur le Nord-Est du continent (Japon, Corée du Sud et Taiwan), s'est

construit sur le modèle du Japon (premier importateur mondial de GNL), qui a développé ses importations sur la base de contrats de long terme indexés sur le prix du pétrole brut. Les marchés émergents asiatiques (Chine, Inde) ont également retenu ce type de contrat pour le lancement de leurs approvisionnements en GNL.

Néanmoins, la crise économique actuelle pourrait favoriser tant en Europe qu'en Asie le report de transactions vers les marchés organisés, où les prix sont (provisoirement) significativement inférieurs à ceux des contrats de long terme.

### Compétition entre l'Europe et l'Asie pour l'accès aux ressources

Si les situations sont apparemment différentes entre l'Europe au marché mature, avec des perspectives de croissance de consommation faible et une production en déclin régulier, et une Asie aux besoins rapidement croissant en énergie et en matières premières, les progressions de leurs importations devraient néanmoins suivre à peu près le même rythme.

Le scénario de référence de l'AIE prévoit ainsi que les importations de l'Europe augmenteraient de 178 bcm entre

2007 et 2030, alors que la Chine, l'Inde et la zone OCDE de l'Asie augmenteraient les leurs de 181 bcm.

Ainsi, plusieurs projets visent à développer les exportations des pays d'Asie Centrale ou de la Russie vers l'Europe *via* la Turquie, mais aussi vers la Chine (à l'Est), vers l'Inde et le Pakistan (au Sud). Ces régions sont également en concurrence sur l'accès aux ressources gazières du Moyen-Orient.

Ces projets répondent à une logique autant économique que géopolitique mettant en concurrence entre eux non seulement l'Europe, la Chine et l'Inde, mais aussi la Russie et l'Iran, qui tentent d'intermédiaire eux-mêmes le gaz de la zone caspienne.

### *La question de la sécurité des approvisionnements de l'Europe*

Les pouvoirs publics européens se sont consacrés pendant plus de dix ans à mettre en place un marché européen du gaz naturel en prenant pour modèle les marchés nord-américain ou anglais, sans vraiment prendre en compte la question de la sécurité de leurs approvisionnements.

Avec les perspectives de dépendance gazière croissante de l'Union européenne vis-à-vis des pays tiers et le caractère révélateur de la crise russo-ukrainienne survenue au début de 2009, la Commission européenne a remis dans ses priorités la réflexion sur la sécurité des approvisionnements gaziers de l'Europe. Elle prépare un règlement visant à accroître la maîtrise des risques liés à une rupture d'approvisionnement. Ce projet de règlement renforce le processus communautaire de gestion en urgence des crises d'approvisionnement et il demande aux États membres de mettre en place un dispositif d'analyse des risques de défaillance des approvisionnements et d'être en mesure de répondre à certaines situations exceptionnellement difficiles.

Il faudra veiller à ne pas cumuler les obligations de niveau européen et les exigences propres aux États

membres, car si la sécurité a un coût, la « sur-sécurité » se ferait au détriment du consommateur et du développement du gaz, au profit des autres énergies fossiles.

Enfin, force est de constater que les règles actuelles de fonctionnement du marché rendent plus difficile le développement de nouvelles chaînes d'approvisionnement.

### Le gaz naturel : une énergie encore en devenir

Le gaz naturel est l'énergie fossile la plus respectueuse de l'environnement, celle dont les réserves sont abondantes et pour laquelle il existe de nombreuses technologies pouvant encore élargir le champ de sa production, de son transport et de son utilisation, que ces technologies existent déjà (le gaz naturel véhicule, la micro-cogénération, *Gas To Liquid*) ou qu'elles soient encore à l'étude (chimie des oléfines, exploitation des hydrates de méthane).

Si tous les pays ne disposent pas de cette ressource, l'exemple passé de l'Europe (en particulier, celui de la France) montre que l'approvisionnement peut totalement reposer sur des importations, tout en assurant aux clients une garantie de fourniture jamais mise en défaut.

*A minima*, pendant la première moitié du XXI<sup>e</sup> siècle, le gaz naturel sera une ressource indispensable à la satisfaction de la demande énergétique et à la maîtrise des émissions de gaz carbonique, grâce à ses qualités environnementales propres, à la possibilité d'associer son utilisation à celle d'énergies renouvelables ou encore à un recours aux techniques de capture et de séquestration du carbone.

### Notes

\* Directeur général adjoint de GDF-Suez, en charge de la branche Global Gaz et GNL.

(1) Quantité théorique.

## La nouvelle géopolitique charbonnière

**Depuis le début des années 2000, le charbon, pourtant fortement critiqué sur le plan environnemental, a fait un retour en force : sa consommation mondiale s'est accrue de 48 % entre 2000 et 2008, et il représente aujourd'hui 27 % du bilan énergétique mondial et 41 % du mix électrique. Alors qu'on le croyait condamné à disparaître, car jugé comme une énergie démodée associée à la révolution industrielle, la vigueur de sa croissance actuelle peut étonner.**

Par Sylvie CORNOT-GANDOLPHE\*

Comment expliquer ce regain d'intérêt ? Cette croissance est-elle pérenne, aussi bien en termes de ressources, de prix que d'implications environnementales ?

Dans une première partie, cet article analyse la dynamique des marchés charbonniers au cours de la dernière décennie et montre la montée en puissance des économies asiatiques, Chine et Inde en tout premier lieu. La deuxième partie s'interroge sur la pérennité de cette croissance, à la lumière de trois critères : a) l'adéquation des réserves charbonnières, b) l'impact de la forte croissance de la demande sur les prix du charbon et sa compétitivité et c) la protection de l'environnement.

### La nouvelle dynamique des marchés charbonniers

#### *Consommation mondiale : l'essor fulgurant des économies asiatiques*

La demande mondiale de charbon (houille et lignite (1)) est passée de 3 275 Mtec (2) en 2000 à 4 863 Mtec en 2008, soit une augmentation de 48 %, alors que, sur la même période, la demande de pétrole n'a augmenté que de 13 % et celle de gaz naturel, de 27 %. La Chine est l'acteur principal de la forte croissance de la demande de charbon. A elle seule, elle en a assuré les deux tiers et sa consommation a plus que doublé entre 2000 et 2008 (passant de 1,2 Gt à 2,75 Gt). Cet engouement répond, bien sûr, aux besoins énergétiques croissants du pays, dont encore les deux tiers sont assurés par le charbon. Le charbon, en Chine, est en effet abondant (192 Gt de réserves prouvées, à la fin 2008) et il permet au pays d'assurer son indépendance énergétique, bien que ses importations aient cru spectaculairement en 2009. L'Inde connaît également un fort accroissement de sa demande, là encore, pour répondre à ses besoins croissants en énergie : alors qu'elle ne consommait que 364 Mt en 2000, sa consommation a atteint 583 Mt en 2008. Aux besoins des deux économies émergentes asiatiques se rajoutent ceux de l'ensemble Japon+Corée+ Taiwan, tradi-

tionnellement les plus gros importateurs de charbon, avec une consommation de 357 Mt en 2008.

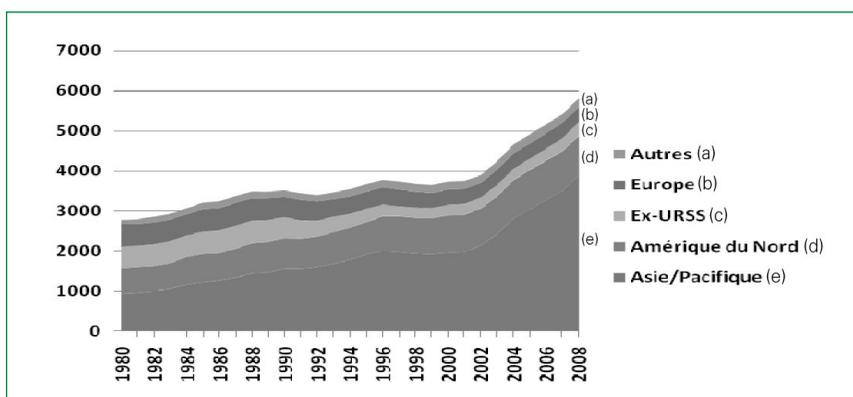
Face à la montée des économies asiatiques et du bassin du Pacifique, les besoins du bassin Atlantique, quant à eux, stagnent. En Europe, les contraintes environnementales pèsent de plus en plus lourd et les nouveaux projets de centrales thermiques au charbon sont soit repoussés, soit annulés. Aux Etats-Unis, le développement des gaz non conventionnels a entraîné une croissance rapide de la production gazière et une forte chute des prix du gaz. Le charbon est devenu moins compétitif et sa consommation (principalement pour l'approvisionnement des centrales thermiques) a baissé, une baisse encore renforcée, en 2009, par une moindre demande d'électricité.

C'est donc un déplacement du centre de gravité du marché charbonnier que l'on observe au cours de cette décennie. Les économies asiatiques renforcent leur prédominance : alors qu'elles ne représentaient que 46 % de la consommation mondiale en 2000, cette part passe à 62 % en 2008 et même à 67 %, pour la houille (voir le graphe 1).

#### *2009 : renforcement de cette tendance au niveau des échanges internationaux*

La crise économique et financière a renforcé la prédominance de l'ensemble Asie/Pacifique dans les échanges internationaux de houille (3). Ceux-ci sont estimés à 943 Mt en 2009 (voir le tableau 1), soit environ 16 % de la production de houille, en très léger repli par rapport à 2008 (de -8,5 Mt). Mais alors que les importations du bassin Pacifique ont poursuivi leur croissance (+ 10 %), celles du bassin Atlantique ont fortement chuté, en raison de la crise économique, qui s'est traduite par une demande moindre en électricité et en acier. Cette tendance a d'ailleurs été renforcée par une concurrence accrue du gaz naturel, tant aux Etats-Unis qu'en Europe.

Dans le bassin du Pacifique, la Chine et (quoique dans une moindre mesure) l'Inde ont été les éléments moteurs de la croissance des importations. La Chine, qui, en 2008, était encore un exportateur net, est devenue un importateur net



**Graphique 1 :** Consommation mondiale de houille, montée des économies asiatiques (Mt).

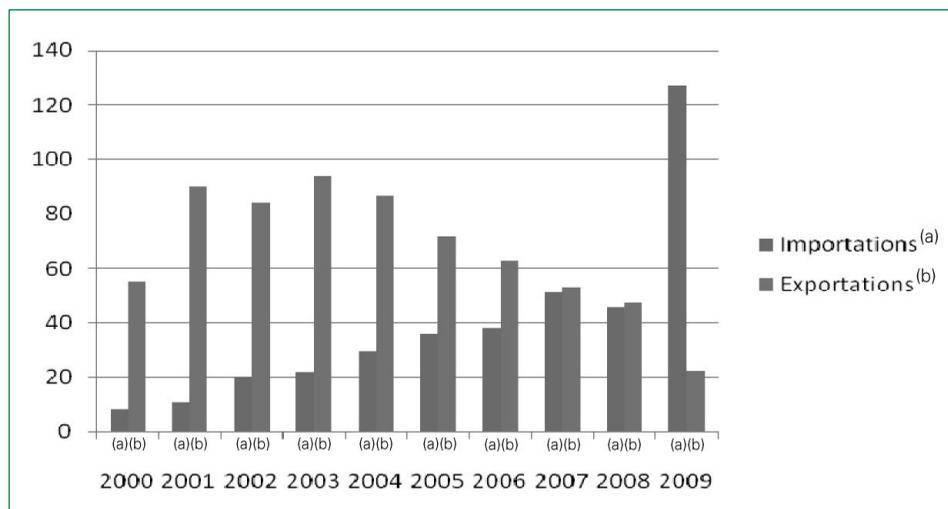
Source : Agence Internationale de l'Énergie (AIE), Coal Information 2009.

<b>Charbon vapeur (Mt)</b>	<b>2008</b>	<b>2009 (est)</b>	<b>% 2009/2008</b>
Japon	128,2	115,0	-10,3
Chine	41,7	92,2	121,1
Corée du Sud	74,0	80,5	8,8
Inde	34,0	45,0	32,4
Malaisie	16,6	16,0	-3,6
Taiwan	65,1	58,5	-10,1
Autres Asie	37,9	35,0	-7,7
<b>TOTAL ASIE</b>	<b>397,5</b>	<b>442,2</b>	<b>11,2</b>
UE-27	184,6	173,9	-5,8
Autres Europe	37,9	29,2	-23,0
Etats-Unis	29,2	19,4	-33,6
Reste du monde	64,3	63,3	-1,6
<b>TOTAL MONDE</b>	<b>713,5</b>	<b>728,0</b>	<b>2,0</b>
<b>% Asie/Monde</b>	<b>56%</b>	<b>61%</b>	
<b>Charbon à coke (Mt)</b>	<b>2008</b>	<b>2009 (est)</b>	<b>% 2009/2008</b>
Japon	57	48	-15,8
Chine	7	34,5	392,9
Corée du Sud	24	20,5	-14,6
Inde	29	25	-13,8
Autres Asie	10	9	-10,0
<b>TOTAL ASIE</b>	<b>127</b>	<b>137</b>	<b>7,9%</b>
UE-27	56	44,5	-20,5
Reste du monde	55	33,5	-39,1
<b>TOTAL MONDE</b>	<b>238</b>	<b>215</b>	<b>-9,7</b>
<b>% Asie/Monde</b>	<b>53%</b>	<b>64%</b>	

**Tableau 1 :** Importations internationales de charbon vapeur et de charbon à coke en 2008/2009 (en milliers de tonnes).  
Source : ATIC Services, ABARE, Clarkson, ICR.

et ce, pour des quantités non négligeables : plus de 100 Mt en 2009 (voir le graphique 2). La hausse des prix des charbons domestiques (grevés par des coûts de transport élevés) par rapport aux prix internationaux a rendu les importations plus attractives, tout particulièrement pour les provinces du Sud-Est du pays. La restructuration de l'industrie charbon-

nière chinoise a accentué ce phénomène, le gouvernement ayant décidé de regrouper la production autour de 13 grandes bases produisant chacune plus de 100 Mt/an et de fermer les petites mines dangereuses. Ainsi, en 2009, le gouvernement a fermé 1 088 petites mines représentant au total une capacité de production de 50 Mt. Pourtant, la



**Graphique 2 :**  
Importations/Exportations de la Chine (Mt).

Source : AIE, Bureau chinois des statistiques.

Chine demeure le premier producteur mondial de charbon (2,96 Gt en 2009, +12,7 % par rapport à 2008) et ses importations nettes ne représentent que 3,7 % de sa demande domestique. C'est là un niveau dérisoire, si on le compare à la consommation du pays, mais très significatif sur l'étroit marché international du charbon : la Chine représente maintenant près de 14 % du marché international et elle est devenue le deuxième importateur mondial (immédiatement après le Japon) en 2009.

Au-delà de son changement de statut, passé d'exportateur net à importateur net, la Chine est devenue le *swing demander* du marché charbonnier : lorsque les prix internationaux sont inférieurs aux prix domestiques, la Chine importe massivement ; mais si les prix à l'importation sont supérieurs aux prix domestiques, elle peut se retirer très vite du marché. C'est une inconnue pesant sur le marché pour les années à venir.

L'Inde voit également ses importations augmenter fortement, même si cette augmentation n'est en rien comparable à la spectaculaire hausse chinoise. Ses importations totalisent 70 Mt en 2009 (en hausse de 7 Mt par rapport à 2008). Bien que l'Inde soit un gros producteur (522 Mt en 2008), la mauvaise qualité de ses charbons, très cendreuse, et leur localisation éloignée des centres de consommation favorisent les importations.

### *Le renforcement de la prédominance de la zone asiatique au cours des 25 prochaines années*

Le *World Energy Outlook* de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE) estime, dans son scénario de référence (4), que la demande mondiale de charbon atteindra 6 981 Mtec en 2030, soit une hausse de 54 % par rapport à 2007, soit +1,9 %, en moyenne, par an. Si ce taux de croissance est impressionnant, il faut le moduler en fonction des régions. L'Asie (non-OCDE) représente, en effet, 97 % de la demande additionnelle. La Chine et l'Inde, qui représentaient près de la moitié de la consommation mondiale en 2008, en consommeraient les deux tiers en 2030. La consommation des pays de l'OCDE, et en particulier celle de l'Europe, est appelée à diminuer sur la même période.

### *Augmentation des émissions de CO<sub>2</sub>*

L'AIE a calculé quelles seraient les implications environnementales de cette trajectoire. Les émissions de CO<sub>2</sub> dues aux activités énergétiques augmenteraient de 29 Gt en 2007 à 40 Gt en 2030, ce qui représente un accroissement de 40 %. Face à ce constat, le message de l'AIE est clair : cette trajectoire est alarmante et insoutenable dans ses implications, aussi bien environnementales, qu'en matière de sécurité de l'approvisionnement énergétique. L'AIE demande aux pouvoirs publics de prendre dès maintenant les mesures nécessaires afin de modifier cette trajectoire et d'aboutir à un avenir énergétique durable, limitant la concentration des GES dans l'atmosphère à 450 ppm, un niveau dont le respect est jugé nécessaire par les climatologues, si l'on veut limiter le réchauffement climatique à 2°C.

Pour quantifier l'effort nécessaire, l'AIE a défini un scénario alternatif montrant comment atteindre cet objectif par une action radicale et coordonnée des pouvoirs publics dans toutes les régions. Dans ce scénario (scénario 450), les émissions de CO<sub>2</sub> culminent à 31 Gt en 2020, puis déclinent ensuite, pour atteindre 26 Gt en 2030. Ces réductions sont le résultat de la mise en œuvre d'une panoplie de nouveaux instruments de politiques énergétiques et climatiques : marchés du carbone, mesures d'efficacité énergétique renforcées dans les transports, les bâtiments, les secteurs électrique et industriel, développement rapide des énergies renouvelables, augmentation de la contribution du nucléaire et développement du captage et du stockage du CO<sub>2</sub> (CSC). La demande d'énergie continue de croître (+20 %) entre 2007 et 2030, mais les gains d'efficacité énergétique réalisés permettent de limiter cette croissance à 0,8 %/an (en moyenne) entre 2007 et 2030, contre 1,5 %/an, dans le scénario de référence.

Le charbon est l'énergie la plus impactée, dans ce scénario : sa demande plafonne à 5 190 Mtec dès 2015, puis elle décline, progressivement, après 2020, jusqu'à 3 250 Mtec en 2030, soit une réduction de près de 50 % par rapport au scénario de référence et une baisse d'un tiers par rapport à 2008, qui ramène son niveau à celui de 2003. La Chine

représente environ la moitié de la réduction de la demande charbonnière par rapport au scénario de référence.

### Quelles sont les conséquences de cette nouvelle dynamique ?

#### *Les réserves de charbon sont-elles suffisamment abondantes pour répondre à la forte hausse de la demande ?*

On peut légitimement s'interroger sur la capacité des réserves à répondre à l'essor de la demande, en particulier de celle de la Chine et de l'Inde. Ne faudrait-il pas, à l'instar du pétrole, se poser la question de la possibilité d'un *peak coal* et craindre que les réserves ne soient pas suffisantes pour répondre à l'accroissement de la demande ? Les réserves de charbon sont estimées par le BGR (5) à 998 Gt à la fin 2008 (729 Gt de houille et 269 Gt de lignite), soit l'équivalent de 146 ans de production actuelle, bien au-delà des horizons du pétrole et du gaz conventionnels, respectivement de 41 et de 59 ans (6). Par ailleurs, les réserves de charbon sont mieux réparties sur la planète que celles des hydrocarbures. Alors que le Moyen-Orient et l'ex-URSS concentrent 74 % des réserves de pétrole et 73 % des réserves de gaz naturel conventionnel, les réserves de charbon sont réparties sur tous les continents, les plus importantes étant situées aux Etats-Unis, en Russie, en Chine, en Inde, en Australie, en Ukraine, en Afrique du Sud et en Allemagne (en ce qui concerne le lignite pour ce dernier pays).

A ces réserves s'ajoutent des ressources de charbon colossales, estimées par le BGR à 16 000 Gt. Elles constituent 84 % des ressources mondiales d'énergie (hors énergies renouvelables). Ainsi, la hausse de la consommation de charbon ne peut être limitée par un problème de réserves. Limitée, elle peut l'être, par contre, par d'autres contraintes pesant sur cette énergie, telles que son impact environnemental ou la capacité de l'infrastructure logistique à répondre à la hausse rapide des importations et des changements de flux observés sur le marché.

Si la question de la capacité des réserves à répondre à l'accroissement de la demande peut être occultée au niveau mondial, il convient toutefois de s'interroger sur cette capacité, dans les cas de la Chine et de l'Inde.

La Chine possède des réserves de 192 Gt, représentant 70 ans de sa production actuelle. Ce pays possède également d'immenses ressources : le chiffre de 5 570 Gt a été avancé par le *China's General Geological Bureau*. Toutefois, la plupart des réserves chinoises sont situées dans le Nord-Ouest et le Nord du pays, loin des centres de consommation du Sud et du Sud-Est du pays, et leur exploitation est donc entravée par des difficultés de transport intérieur. Leur mobilisation représente un véritable défi logistique et financier, en particulier pour développer le réseau ferroviaire, qui est aujourd'hui inadéquat et présente de nombreux engorgements, d'où des pénuries récurrentes et un recours accru aux importations.

L'Inde possède des réserves de 81 Gt, représentant 155 ans de production actuelle. Mais, là encore, les réserves sont éloignées des centres de consommation et, de plus, le charbon est de mauvaise qualité, ces deux facteurs favorisant les importations. Par ailleurs, le secteur est dominé par une très forte prédominance des entreprises publiques, qui rencontrent de plus en plus de difficultés à atteindre les objectifs de production que leur assigne le gouvernement. Pour palier ce problème, le nouveau gouvernement est en train de mettre en place une ouverture du secteur à l'investissement privé. Celle-ci devrait permettre d'apporter les capitaux nécessaires au développement de la production domestique, mais sa mise en place est longue, entravée par de nombreux problèmes administratifs.

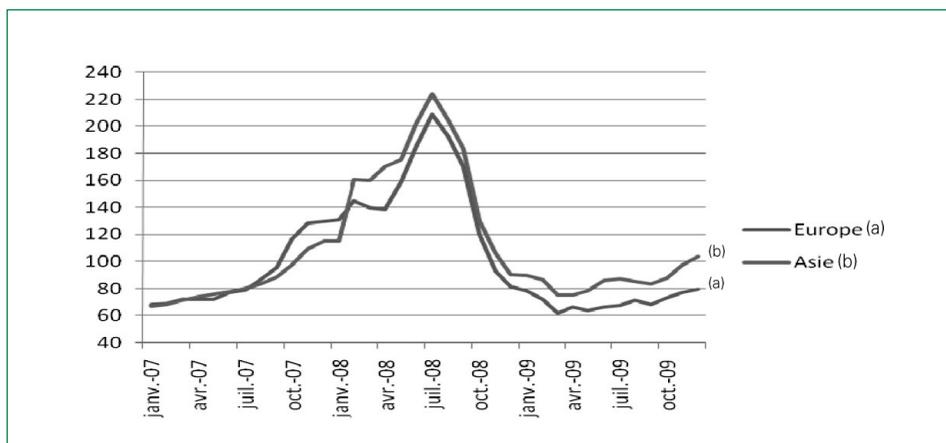
Pour garantir leur approvisionnement, ces deux pays se sont lancés dans une vaste campagne d'acquisitions d'actifs miniers à l'étranger, soit en rachetant des compagnies minières (principalement en Australie, en Indonésie et en Afrique), soit en exploitant eux-mêmes des mines à l'étranger. Dans cette course, ils se retrouvent parfois en concurrence entre eux, pour accéder à des ressources charbonnières jusqu'à présent facilement accessibles. En 2009, la Chine a ainsi opéré des rachats d'actifs miniers pour un montant de 19 milliards de dollars, parmi lesquels nous mentionnerons l'acquisition de la compagnie australienne Felix Resources par Yanzhou Coal, pour un coût de 3 milliards de dollars.

En ce qui concerne l'Inde, l'achat d'actifs miniers à l'étranger par *Tata Steel* se poursuit (en Indonésie, en Australie et au Mozambique). Par ailleurs, le gouvernement a créé l'*International Coal Ventures Ltd* (ICVL) afin de coordonner l'achat d'actifs à l'étranger. Cette organisation regroupe la *Coal India Limited* (CIL), la *National Thermal Power Corp* (NTPC), la *Rashtriya Ispat Nigam Limited* (RINL), la *Steel Authority of India Limited* (SAIL) et la *National Mineral Development Corporation* (NMDC) ; elle dispose d'un budget d'un milliard de dollars et elle a accès à des prêts d'un montant double. La *CIL* a lancé, de son côté, un appel à intérêt afin de créer des *joint-ventures* avec des compagnies internationales afin de développer des projets miniers à l'étranger. Elle a ainsi sélectionné récemment neuf compagnies (indonésiennes, australiennes et américaines).

Si l'Afrique, avide de capitaux étrangers, est très favorable à cette entrée de capitaux, il n'en va pas de même en ce qui concerne l'Australie, dont le gouvernement, qui cherche à réglementer l'entrée de capitaux publics dans ses ressources stratégiques, pose certaines conditions dans les cas où l'investisseur étranger est également un acheteur futur des ressources, ainsi que dans ceux où il représente une entreprise publique.

#### *Quel en est l'impact sur les prix du charbon ?*

La brusque augmentation des importations de charbon du bassin du Pacifique s'est traduite par des tensions sur le marché et par une volatilité accrue des prix du charbon. Ces tensions et cette volatilité ont commencé à se manifester au début 2008, tandis qu'une série d'intempéries restrei-



**Grappe 3 :** Prix du charbon vapeur rendu Asie/Europe 2007-2009 (\$/t).

Source : International Coal Report.

gnait les capacités d'exportation des principaux pays exportateurs (ainsi, des pluies torrentielles s'abattaient sur le Queensland (Australie) en janvier et février 2008, inondant les mines du bassin de Bowen et contraignant cinq producteurs australiens à se déclarer en situation de force majeure).

De plus, des chutes de neige exceptionnelles, en Chine, obligeaient le gouvernement à déclarer l'arrêt temporaire des exportations de charbon vapeur afin de parer aux pénuries de plusieurs provinces du Sud et de l'Est du pays. La Chine était encore, à l'époque, un exportateur important : cela fit craindre un risque de pénurie sur le marché international. Dans le même temps, plusieurs pays exportateurs étaient contraints de limiter leurs exportations de charbon vapeur. L'Afrique du Sud connaissait, depuis le début de l'année 2008, une grave crise d'approvisionnement en électricité : la demande électrique du pays avait augmenté plus rapidement que ses capacités de production, principalement thermoélectriques-charbon, d'où des délestages récurrents, qui affectaient sérieusement la production et les exportations de charbon du pays. Au Venezuela, le gouvernement Chavez étendait au charbon sa politique de reprise des actifs stratégiques du secteur minier national : à la fin décembre 2007, la force majeure était invoquée dans l'arrêt des livraisons du Guasare. Il s'ensuivra une baisse des exportations de ce pays de 20 % en 2008.

Face aux contraintes pesant sur les capacités d'exportation et à une demande toujours élevée en Asie, les prix CAF (7) du charbon vapeur s'envolèrent : ils atteindront 217 \$/t en Europe en juillet 2008. A cette date, on pouvait se demander jusqu'à quel niveau ils continueraient à grimper. C'était sans compter sur l'effet ravageur de la crise économique et financière, qui a tout d'abord affecté les frets maritimes : ceux-ci, après un pic, en mai/juin 2008, perdront 45 % de leur valeur au cours de l'été. La baisse des prix CAF du charbon vapeur amorcée à partir de la mi-juillet 2008 va tout d'abord refléter cette baisse, les prix FOB (8) restant, quant à eux, à des niveaux élevés tout l'été. Le tournant se produit après le 15 septembre, suite à la mise en faillite de la banque *Lehman Brothers*. Les nouvelles pessimistes s'accumulent et vont provoquer la dégringolade des tarifs du fret, puis celle du prix du charbon vapeur. Les spéculateurs se retirant du marché, les prix entament leur

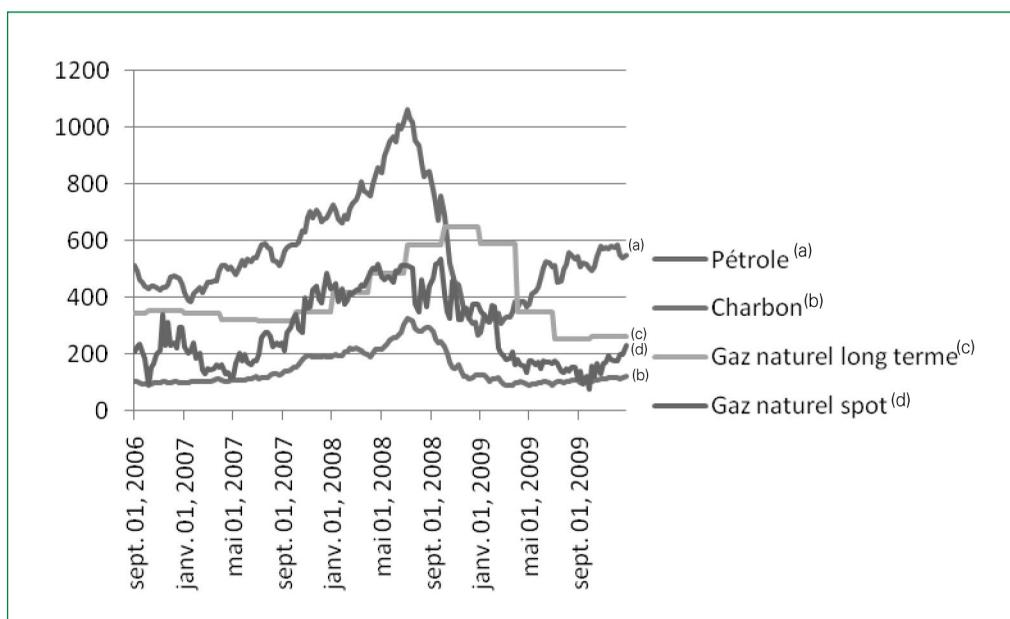
repli : les prix CAF repassent au-dessous de la barre des 100 \$ début novembre et terminent l'année à 80 \$ CAF Europe et 90 \$ CAF Asie. Les marchés ne sont plus dans l'euphorie du début de l'année et 2009 s'annonce morose. Les prévisions de consommation d'électricité sont revues à la baisse. La demande d'acier et sa production chutent brutalement ; les annonces de fermetures de hauts fourneaux se multiplient, entraînant une moindre demande de charbon à coke.

Face à la baisse de la demande et à la chute des prix, les groupes miniers réagissent en fermant des mines ou en réduisant leur production. Mais leur action ne suffira pas à ralentir la chute des prix, qui se poursuivra pendant les cinq premiers mois de l'année 2009. Toutefois, une hausse – brutale et imprévisible – des importations chinoises va changer la donne. Le marché se tend, en Asie, dès l'été 2009 et les prix CAF du charbon vapeur augmentent de 10 \$. Après une pause, en septembre, les prix rendus Asie ne cesseront d'augmenter. Le début de l'hiver et les chutes de neige en Chine provoquent de nouvelles tensions sur le marché. En décembre 2009, le prix atteint 103,7 \$/t (en moyenne). Malgré cette hausse, le prix international demeure attractif pour les acheteurs chinois. En Europe, bien que la demande reste faible, les prix européens sont contaminés par les prix asiatiques, qui tirent le marché. Toutefois, l'écart entre les prix européen et asiatiques dépasse les 20 \$ à la fin décembre 2009 (voir le graphe 3).

Ainsi, même si les réserves de charbon sont abondantes, l'industrie charbonnière reste, à l'instar des autres sources d'énergie, une industrie cyclique, gouvernée par des cycles d'investissement dans les mines, les capacités d'exportation peinant, parfois, à suivre l'expansion de la demande. Fin 2009/début 2010, les marchés sont de nouveau tendus, en raison d'une augmentation des importations chinoises et indiennes.

### *Le charbon est-il encore compétitif ?*

Face aux bouleversements qu'ont connus les marchés énergétiques en 2009, et en particulier la chute des prix spot du gaz naturel, le charbon a perdu de sa compétitivité (voir le graphe 4). En équivalence énergétique, toutefois, il demeure le moins cher de tous les combustibles : le char-



**Graphique 4 :**  
Evolution du prix  
des énergies en  
Europe (\$/tep).

Source : ATIC Services.

bon importé en Europe coûte quatre fois moins cher que le pétrole (Brent daté) et trois fois moins que le gaz naturel (au prix moyen des contrats européens à long terme). Sa compétitivité vis-à-vis du gaz naturel spot, dont le prix s'est écroulé en 2009 (passant de 10,8 \$/million de Btu (en moyenne) en 2008 à 4,6 \$/million de Btu en 2009), est devenue moins évidente, et n'était plus du tout certaine quand le prix spot du gaz a baissé en dessous des 3 \$/million de Btu, en septembre et octobre 2009. Cette situation devrait perdurer aussi longtemps que la bulle gazière n'aura pas disparu, ce que les experts estiment devoir se produire aux environs de 2015.

### Une nécessité : rendre le charbon propre

Si l'abondance de ses réserves et son prix font du charbon une énergie privilégiée, principalement en Asie, il n'est pas de même du point de vue environnemental. En effet, dans son utilisation principale, la production d'électricité, la comparaison des émissions de CO<sub>2</sub> par les centrales électriques est en défaveur du charbon, qui en émet deux fois plus que les centrales au gaz naturel, leurs principales concurrentes dans la production d'électricité. L'adoption de nouvelles réglementations visant à limiter les émissions de gaz à effet de serre (en particulier le CO<sub>2</sub>) limite ainsi l'usage du charbon à cette fin et rend impérieuse la nécessité de rendre le charbon plus propre. Bien que les débats du COP 15 à Copenhague n'aient pas abouti à un accord contraignant, il apparaît certain que les contraintes en matière d'émissions de CO<sub>2</sub> vont devenir de plus en plus strictes, si ce n'est à l'échelon mondial, tout au moins au niveau régional et, en tout premier lieu, à l'échelon européen. Même si la Chine et l'Inde n'ont pas signé d'accord en vue de réduire leurs émissions de CO<sub>2</sub>, il faut souligner qu'elles ont annoncé une dé-carbonisation de leur économie. Ainsi, la Chine prévoit une baisse de 40 à 45 % de sa consommation d'énergie par unité de PIB d'ici à 2020, et l'Inde prévoit une baisse de 20-25 % de la sienne. L'impératif du développe-

ment économique de ces deux pays aboutit toutefois à un accroissement élevé de leur consommation énergétique, dont une part importante sera assurée par le charbon, principalement pour la production d'électricité. Leurs émissions de CO<sub>2</sub> associées à cette consommation vont donc s'élever fortement : on prévoit ainsi que plus de 11 Gt seront émises en 2030 par ces deux pays, ce qui représentera 60 % des émissions mondiales dues à la consommation de charbon à cet horizon.

Il faut toutefois souligner l'effort qu'ils ont entrepris en matière de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de leurs centrales thermiques au charbon. La Chine poursuit la modernisation de son parc. Depuis 2004, plus de la moitié des nouvelles commandes de centrales concernent des unités supercritiques, dont l'efficacité énergétique est voisine de 41 %. Par ailleurs, dix centrales de 1 000 MW chacune, basées sur une technologie ultra-supercritique (avec un rendement proche de 50 %) ont récemment été construites. Ces centrales permettront de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> par MWh produit d'environ 40 % par rapport au parc existant. Le gouvernement a aussi décidé de fermer les petites centrales d'une capacité inférieure à 20 MW, très inefficaces (leurs rendements étant de l'ordre de seulement 20 %). Ces mesures ont permis d'accroître le rendement moyen du parc chinois de centrales thermiques au charbon, qui atteint aujourd'hui 33,2 %. La Chine s'est également lancée dans la course au charbon propre : elle est en train de construire, à proximité de Pékin, une centrale de 650 MW, équipée de système CSC (capture et stockage du CO<sub>2</sub>) (projet GreenGen).

L'Inde est moins avancée dans ce domaine, sa priorité étant l'électrification du pays : il est de fait que la moitié de la population indienne n'a pas encore accès à l'électricité. Ce pays s'est donc lancé dans un programme ambitieux de construction de nouvelles capacités électriques devant atteindre au total 78 GW, d'ici à 2012. Il s'agit, pour la majeure partie d'entre elles, de centrales supercritiques au charbon, qui permettront d'augmenter le rendement moyen

du parc, particulièrement bas aujourd'hui, et donc de réduire les émissions indiennes de CO<sub>2</sub> par MWh d'électricité produite.

### Une géopolitique charbonnière dominée par les économies asiatiques émergentes

Depuis quelques années, mais davantage encore depuis 2009, les aléas du marché charbonnier global sont liés à ceux du marché chinois. Les importations de l'Empire du Milieu représentent désormais 14 % de celles du marché mondial du charbon et la politique énergétique du gouvernement chinois a des conséquences pour le monde entier. L'Inde, dont les importations de charbon représentent aujourd'hui 7,5 % des importations mondiales, renforce encore cette prédominance de la zone asiatique.

Aujourd'hui, tous les grands groupes miniers réorientent leur stratégie de manière à répondre à l'appétit croissant des deux grandes économies émergentes asiatiques. Un exemple significatif en est le contrat, qualifié de « contrat du siècle », que vient de signer avec la Chine la compagnie minière australienne *Ressourcehouse*. Aux termes de ce contrat, évalué à 60 milliards de dollars, la compagnie australienne va livrer 30 Mt/an de charbon à la *China International Power Holding* pendant 20 ans. Autre exemple significatif : les exportations sud-africaines de charbon vapeur, qui jusque-là étaient principalement destinées à l'Europe, ont été livrées pour moitié à l'Inde, en 2009, et cette part pourrait atteindre les 75 % dès 2010 !

Conjuguées aux acquisitions directes d'actifs miniers en Australie, en Afrique, en Indonésie, et même aux Etats-Unis, c'est bien une géopolitique entièrement nouvelle qui est en train de se dessiner sur la scène charbonnière mondiale.

### Notes

\* Adjointe au Directeur commercial et logistique Maritime, Groupe ATIC Services.

(1) La houille regroupe deux catégories de charbon : le charbon vapeur (principalement utilisé dans les centrales électriques et l'industrie) et le charbon à coke (utilisé comme matière première dans l'industrie sidérurgique). Le lignite, variété de charbon dont le pouvoir calorifique est inférieur à celui de la houille, est principalement utilisé dans les centrales thermiques situées à proximité des mines.

(2) La tec (tonne équivalent charbon) permet de comparer les données concernant des charbons de qualités différentes ; elle permet d'addi-

tionner des tonnes physiques de houille et de lignite, en les ramenant à un pouvoir calorifique moyen.

1 tec = 0,7 tep (tonne équivalent pétrole) = 7 000 kcal = 23,9 GJ.

(3) Rappelons que le lignite participe peu au commerce international de charbon, puisqu'il est consommé majoritairement à proximité de ses lieux d'extraction.

(4) Le scénario de référence ne représente pas notre futur énergétique. Il constitue une trajectoire énergétique basée sur les tendances passées et sans nouvelle action visant à faire dévier ces trajectoires. Il peut être considéré comme un scénario *business as usual* tenant compte des changements de politiques énergétiques et climatiques annoncées, mais se limitant à ces seules annonces et montrant, dans ce cas, quel serait l'avenir énergétique.

(5) BGR : *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe*, Hannover.

(6) Ces ratios doivent être modulés en tenant compte des réserves d'hydrocarbures non conventionnels, particulièrement prometteuses, dans le cas du gaz naturel.

(7) CAF : Coût Assurance Fret.

(8) FOB : *Free on Board* : prix au port de chargement

### Bibliographie

ABARE. *Australian commodities. Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics*, Canberra (publication trimestrielle).

AIE, *World Energy Outlook 2009*, Agence Internationale de l'Energie/OCDE, Paris, 2009.

AIE, *Coal Information 2009*, Agence Internationale de l'Energie/OCDE, Paris, 2009.

ATIC Services, *Carbo Quid Novi, ATIC Services*, Paris (revue de presse interne, publication bi-mensuelle).

BGR, *Reserves, Resources and Availability of Energy Resources 2008*, *Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe*, Hannover, 2009.

CHALMIN (P.), *Cyclope : Les marchés mondiaux*, Economica, Paris, 2009.

CORNOT-GANDOLPHE (S.) & MARTIN-AMOUROUX (J.M.), *Tempêtes sur les marchés charbonniers : quelles séquelles ?*, *Revue de l'Energie* 59, 583, 149-157, 2008.

KALAYDJIAN (F.) & CORNOT-GANDOLPHE (S.), *La nouvelle donne du charbon*, Editions Technip, Paris, 2009 ;

MARTIN-AMOUROUX (J.M.), *Le grand retour du charbon*, *Futuribles*, numéro 357, novembre 2009 ;

MARTIN-AMOUROUX (J.M.), *Les métamorphoses d'une industrie. La nouvelle géopolitique du XXI<sup>e</sup> siècle*, Editions Technip, Paris, 2008.

## Les matières premières nucléaires

Depuis 1990, la production annuelle des mines d'uranium ne couvre que de 50 à 60 % de la consommation totale des réacteurs. Le complément d'offre, que l'on nomme « ressources secondaires », correspond à de l'uranium déjà extrait, c'est-à-dire à de la matière fissile déjà stockée ou déjà utilisée, mais retraitée afin d'être réutilisable. Cependant, les stocks commerciaux excédentaires sont désormais proches de la résorption...

par Bernard BIGOT\*

Aujourd'hui, l'énergie nucléaire assure 16 % de la production mondiale d'électricité, soit 2 700 TWh/an, avec plus de 400 réacteurs en fonctionnement. 45 réacteurs électronucléaires sont en construction dans le monde et environ 130 autres sont prévus, principalement en Chine, en Inde, au Japon, aux Etats-Unis et dans la Fédération de Russie. En outre, de nombreux pays (notamment du Moyen-Orient et d'Asie) ne comptant pas encore de réacteurs de puissance dans leur parc électrique ont décidé d'opter pour le nucléaire. L'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA) prévoit une augmentation de 20 à 80 % de la puissance nucléaire installée dans le monde à l'horizon 2030.

La croissance de la demande mondiale d'électricité, l'épuisement progressif des ressources fossiles et la logique de réduction des émissions de gaz à effet de serre promettent un bel avenir au nucléaire civil. Mais celui-ci pourra-t-il satisfaire durablement une demande d'énergie qui ne cesse d'augmenter ?

La matière première nécessaire pour assurer le développement du nucléaire est, en premier lieu, la ressource combustible. Actuellement, cette ressource est le minerai d'uranium, qui est de mieux en mieux utilisé, mais d'une façon encore très partielle (à hauteur de moins de 1 %), car une partie seulement de l'uranium naturel est fissile, dans les réacteurs actuels. A terme (d'ici quelques dizaines d'années), l'utilisation de cette ressource pourra être considérablement améliorée... A plus long terme encore, le lithium et le deutérium contenu dans l'eau pourront être les combustibles des réacteurs à fusion.

Nous montrerons dans cet article que les ressources actuellement identifiées sont suffisantes pour assurer des centaines (voire des milliers d'années) de fonctionnement des réacteurs nucléaires, dès lors que les technologies de réacteurs adéquates sont (et seront) développées.

### La consommation d'uranium par les réacteurs actuels

Le combustible de la plupart des réacteurs nucléaires actuels est l'uranium, un élément naturel constitué de deux principaux isotopes  $^{238}\text{U}$  et  $^{235}\text{U}$ , dans un rapport de 99,27 %

d' $^{238}\text{U}$  et seulement 0,72 % d' $^{235}\text{U}$ . Dans les réacteurs actuels à eau « légère » (en abrégé, REL) (l'eau légère étant ici entendue par opposition à l'eau lourde), c'est principalement l'isotope naturel  $^{235}\text{U}$  qui est fissile et peut donc libérer de l'énergie. Dans ces réacteurs, l'uranium naturel doit être enrichi en isotope 235 dans une proportion de l'ordre de 3 à 5 %, pour fabriquer un combustible dit UOX (pour oxyde d'uranium). De cette opération d'enrichissement résulte de l'uranium dit « appauvri », qui ne contient plus que de 0,2 à 0,3 % d' $^{235}\text{U}$ . Il faut toutefois noter que, dans le cœur des réacteurs REL, l'isotope  $^{238}\text{U}$  se transmute en faible proportion en plutonium  $^{239}\text{Pu}$  fissile, et que cet isotope de plutonium fournit environ un tiers de l'énergie totale. Au final, l'uranium naturel initial n'est utilisé qu'à moins de 1 % et l'essentiel de ce qui est retiré des mines se retrouve ainsi sous la forme d'uranium appauvri, entreposé en attendant une valorisation future.

Pour tous les réacteurs qui en consomment, le besoin en uranium naturel peut être exprimé en fonction des besoins de l'amont du cycle nucléaire et des performances des réacteurs (rendement thermoélectrique et taux de combustion), par la formule simple ci-après :

$$U = \frac{365,25}{T \times R} \times \frac{\varepsilon - \varepsilon a}{\varepsilon n - \varepsilon a}$$

Dans laquelle :

$U$  représente la masse d'uranium naturel par unité d'énergie électrique produite (t/GWe/an) ;

$T$  est le taux de combustion de décharge du combustible (GWj/t) ;

$R$  : le rendement thermoélectrique du réacteur ( $R < 1$ ) ;

$\varepsilon$  : le taux d'enrichissement du combustible (en %) ;

$\varepsilon a$  : le taux d'enrichissement de rejet (en %) ;

$\varepsilon n$  : le taux d'enrichissement de l'uranium naturel (en %).

Nous verrons plus loin comment il est possible de diminuer la consommation d'uranium rapportée à l'énergie produite non seulement en mettant à contribution ces différents paramètres, mais aussi en prenant en considération l'aval du cycle sous l'angle des possibilités de recyclage des matières fissiles.

Les réacteurs actuellement en service dans le monde sont de divers types, et même si les réacteurs à eau légère

constituent une très forte majorité, il existe aussi des réacteurs à eau lourde (comme les CANDU canadiens) et des réacteurs à gaz (GT-MHR). L'économie de l'uranium est un peu meilleure dans ces réacteurs à eau lourde, sachant qu'en règle générale le facteur clé qui différencie les réacteurs, est surtout le rendement thermodynamique, un facteur lié essentiellement à la température de fonctionnement des fluides caloporteurs utilisés.

La figure 1 présente une comparaison entre les consommations en uranium naturel des principales filières de réacteurs nucléaires.

Un ordre de grandeur de 150 à 200 tonnes d'uranium par GWe/an (c'est-à-dire une vingtaine de tonnes d'uranium naturel par TWh) est assez robuste. La consommation mondiale peut en être rapidement déduite : compte tenu des 2 700 TWh annuels produits par le nucléaire, elle s'établit à un peu plus de 60 000 tonnes.

Face à cette demande actuelle très inélastique (très peu sensible au prix) à court terme, nous présenterons les aspects miniers de la ressource en uranium, puis nous passerons en revue les moyens permettant d'économiser la ressource dans une perspective de moyen et long terme.

### Les ressources mondiales en uranium

En dehors de la production d'énergie nucléaire, l'uranium n'a pas d'autre utilisation importante. Il est relativement répandu dans l'écorce terrestre, au taux d'environ de 3 g/tonne. Il est généralement extrait de gisements de concentrations allant de 1kg/tonne à 200 kg/tonne, par des techniques minières et hydro-métallurgiques classiques. L'uranium peut également être un sous-produit de l'extraction de phosphates, de charbon, de cuivre ou d'or. Il est également présent dans l'eau de mer, à raison de 3 mg/m<sup>3</sup>.

On distingue les ressources primaires d'uranium (ou ressources en terre) des ressources secondaires, qui sont essentiellement le fruit du recyclage (direct ou différé) de matières nucléaires (civiles ou militaires).

#### Les ressources primaires

L'AIEA (Agence Internationale de l'Énergie Atomique) et l'OCDE/AEN (Organisation de Coopération et de

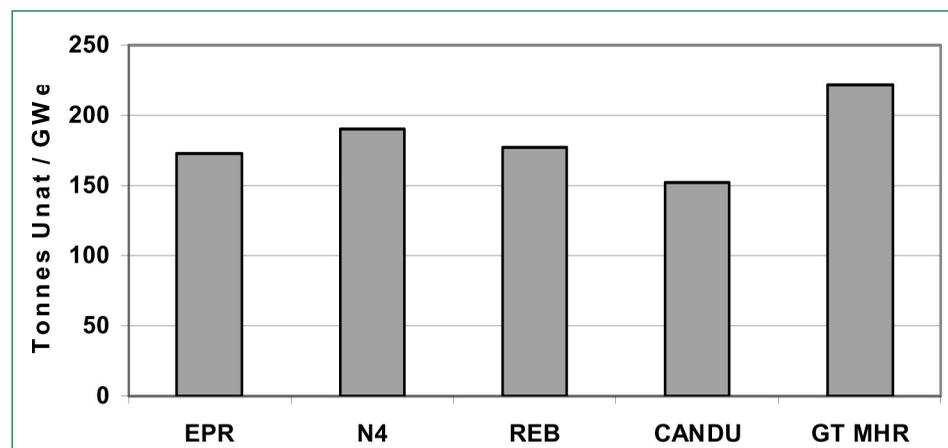
Développement Économique/Agence pour l'Énergie Nucléaire) répertorient les données sur les ressources en uranium, qu'elles éditent tous les deux ans dans leur « Livre rouge ». Le tableau 1, extrait de l'édition 2008, présente la meilleure évaluation actuellement disponible des ressources conventionnelles en uranium de la planète.

Les ressources primaires (dites classiques ou conventionnelles) sont les ressources ayant déjà fait l'objet d'une exploitation industrielle. Elles se subdivisent en diverses catégories, par degré de connaissance géologique des gisements et par catégorie de coût de récupération de l'uranium. Elles comportent les « ressources identifiées » (qui sont le regroupement des ressources « raisonnablement assurées » et des ressources « présumées »), autrement dit les gisements découverts, étudiés et correctement évalués, ainsi que leurs prolongements immédiats. Les ressources classiques comportent aussi des ressources « non découvertes », dont l'évaluation est faite à dire d'expert, sur la base des connaissances et raisonnements géologiques du moment.

Les réserves mondiales identifiées, du moins celles estimées récupérables pour un coût inférieur à 130 \$ par kg d'uranium, étaient, en 2007, de 3,3 millions de tonnes, auxquelles il convient d'ajouter 2,1 millions de tonnes de ressources présumées. Compte tenu d'une consommation actuelle de l'ordre de 65 000 tonnes par an (cf. supra), les ressources identifiées correspondraient à près de quarante-cinq années de fonctionnement des réacteurs en service. Mais, selon l'AEN, 10 millions de tonnes d'uranium resteraient à découvrir. A ces quantités, on peut aussi ajouter environ 22 millions de tonnes d'uranium susceptibles d'être extraites de minerais de phosphates (à des prix plus élevés) (cf. les figures 2 et 3).

Il faut noter que ces réserves sont en grande partie accessibles au cours actuel du marché, qui a remonté très fortement depuis 2007, atteignant actuellement environ 60 USD/lbU308, pour les contrats de long terme (cf. la figure 7).

La production mondiale d'uranium s'établit à environ 40 000 tonnes. Elle est en croissance assez marquée, notamment grâce à une augmentation importante de la production kazakhe. La couverture de la différence entre production et consommation reste assurée grâce à un déstockage important de ressources secondaires.



**Figure 1 :** Consommation d'uranium par filières de réacteurs pour les réacteurs EPR, N4 (réacteur à eau pressurisée de 2<sup>e</sup> génération), réacteur à eau bouillante standard, CANDU canadien à eau lourde et réacteur à haute température GT-MHR.

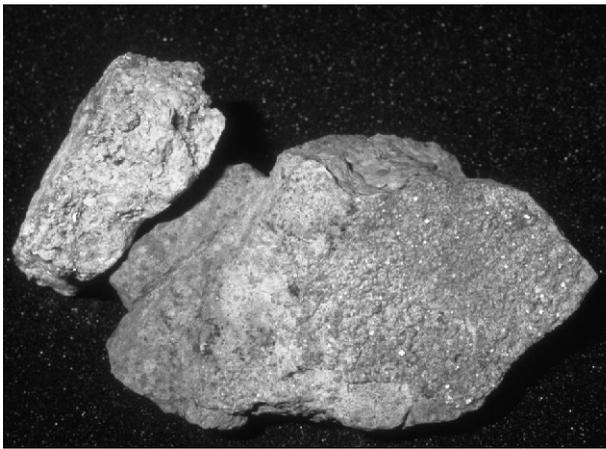


Figure 2 : Minerai d'uranium, source AREVA.



Figure 3 : Mine à ciel ouvert du site Mc Lean Lake, au Canada (source AREVA).

Les principaux pays où l'on extrait actuellement de l'uranium sont représentés sur le planisphère de la figure 4. Selon les dernières statistiques (Livre rouge 2008), le Canada et l'Australie représentent, à eux seuls, 44 % de la production mondiale d'uranium, et 8 pays seulement, à savoir le Canada (25 %), l'Australie (19 %), le Kazakhstan (13 %), le Niger (9 %), la Fédération de Russie (8 %), la Namibie (8 %), l'Ouzbékistan (6 %) et les États-Unis (5 %), contribuent à cette production à la hauteur de près des 93 %.

### Les ressources secondaires

Depuis 1990, la production annuelle des mines, de l'ordre de 40 000 t, ne couvre que de 50 à 60 % de la consommation totale des réacteurs en uranium. Le complément d'offre, que l'on nomme « ressources secondaires », correspond à de l'uranium déjà extrait, c'est-à-dire à de la matière déjà stockée ou déjà utilisée, mais retraitée afin d'être réutilisable.

De 1945 à 2006, la production mondiale d'uranium aurait dépassé les besoins d'environ 625 000 t d'uranium. (La figure 5 montre ce désajustement structurel entre la production et la demande).

L'analyse traditionnelle opérée par les spécialistes du secteur distingue trois origines différentes de ces ressources secondaires :

- ✓ les stocks d'uranium (naturel et enrichi, d'origine tant civile que militaire) ;
- ✓ l'uranium produit par ré-enrichissement d'uranium appauvri ;
- ✓ enfin, l'uranium et le plutonium obtenus par traitement/recyclage du combustible utilisé extrait des réacteurs.

Le déstockage d'uranium militaire s'inscrit dans le cadre d'accords stratégiques pour la réduction des arsenaux. Il est

	Ressources conventionnelles ou classiques (MtU)			
	Ressources identifiées		Ressources non découvertes	
	Raisonnement assurées	Présumées	Pronostiquées	Spéculatives
< 40 USD/kgU (15 USD/lbU3O8)	1,8	1,2	1,9	
40-80 USD/kgU (15-30 USD/lbU3O8)	0,8	0,6		4,8
80-130 USD/kgU (30-50 USD/lbU3O8)	0,7	0,3	0,8	
> 130 USD/kgU (> 50 USD/lbU3O8)				3,0
Sous Total	3,34	2,13	2,8	7,8
TOTAL	5,5		10,5	

Tableau 1 : Ressources conventionnelles mondiales en uranium. Les ressources sont données en millions de tonnes d'uranium et les prix en US dollar/kg d'uranium ou par livre britannique (lb) d'oxyde U3O8, unité usuelle des mineurs.

Source : AIEA/OCDE 2008.



Figure 4 : Répartition mondiale des ressources identifiées d'uranium (<130 \$/kg d'U).  
Source : AIEA/OCDE 2008.

en effet précisé, dans les accords russo-américains, que la Fédération de Russie transformerait (sur une période de 20 ans) 500 t d'uranium hautement enrichi (issu de son armement nucléaire) en uranium faiblement enrichi. De leur côté, les Etats-Unis se sont engagés à assurer le traitement final de près de 375 t d'uranium hautement enrichi pour alimenter des réacteurs commerciaux, des réacteurs de recherche, ou des réacteurs de propulsion navale. Ces quantités contribuent aujourd'hui encore à alimenter les marchés de l'uranium et de l'enrichissement.

Le second moyen de compléter les ressources primaires actuelles consiste à ré-enrichir de l'uranium appauvri. En

effet, selon le prix de l'uranium naturel et le coût des services d'enrichissement, un intérêt économique à enrichir de l'uranium appauvri à des teneurs plus élevées que celles correspondant à l'équilibre économique en vigueur est susceptible de se faire jour. La hausse récente du cours de l'uranium naturel a ainsi conduit à mobiliser les quantités d'uranium appauvri produites lors de périodes où l'uranium était bon marché : les prix élevés atteints par l'uranium naturel permettent en effet, dès à présent, d'exploiter le différentiel des teneurs en  $^{235}\text{U}$  constaté entre les uraniums appauvris les plus « riches » et les taux de rejet actuels. Une estimation – prudente – de ce volume aboutit à 2 000 ou 3 000 t d'ura-

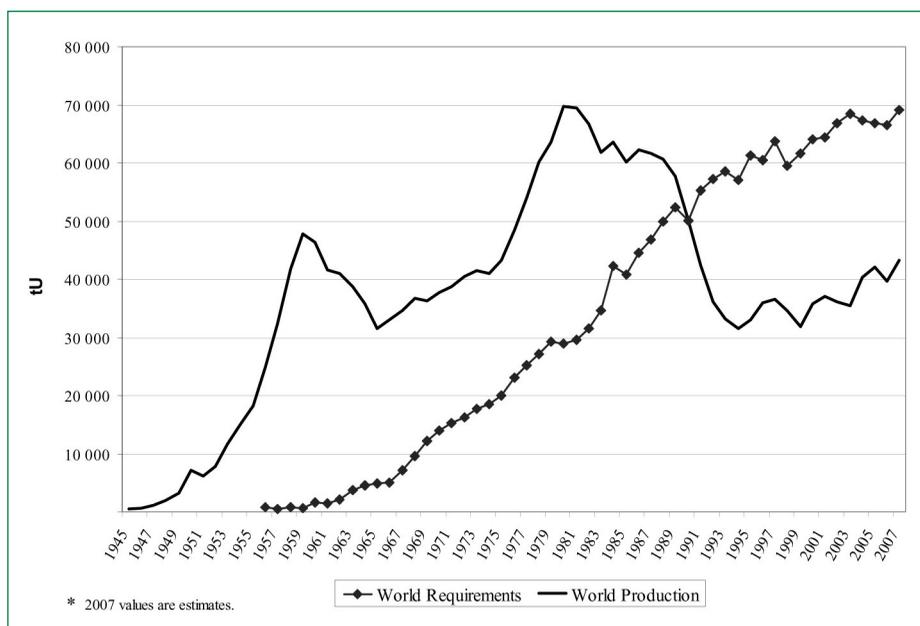
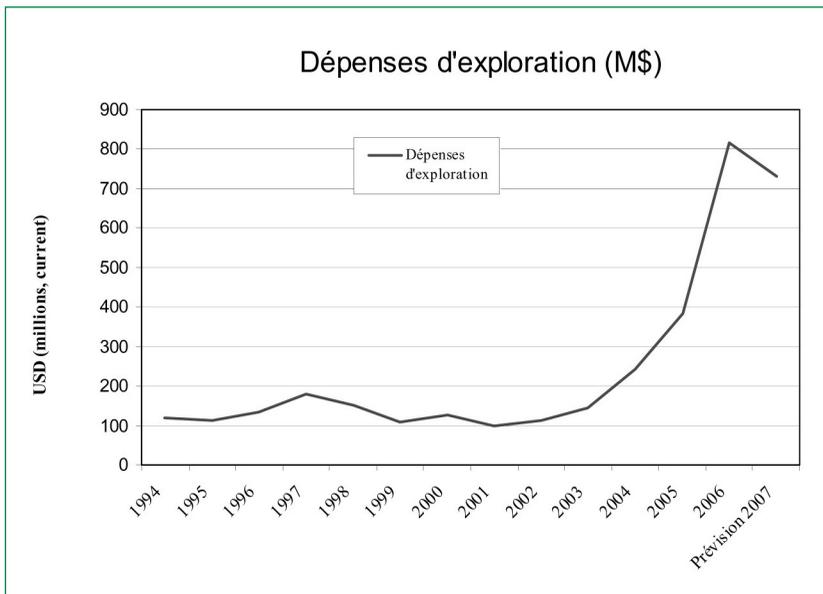


Figure 5 : Production et demande annuelles d'uranium (1945-2007).

Source : AIEA/OCDE 2008.



**Figure 6 :** Évolution des dépenses de prospection et de développement.

Source : AIEA/OCDE 2008.

nium par an. Ce rythme dépendra à la fois du prix de marché de l'uranium naturel et des capacités industrielles. Ces opérations pourront s'étager sur 30 à 50 ans, c'est-à-dire sur une durée d'ordre comparable à celle de la constitution des stocks actuels.

La troisième ressource secondaire, le recyclage (que nous présenterons plus loin) porte sur les progrès techniques des prochaines décennies, seuls capables d'infléchir les tendances à long terme (les deux premières sources secondaires ayant chacune une durée limitée).

### Géopolitique de l'uranium

La comparaison entre les niveaux de demande et les ressources d'uranium actuelles montre que la production de combustible nucléaire peut être assurée à moyen terme sans encourir le risque majeur d'une flambée des prix, qui mettrait la compétitivité du nucléaire en danger. Signalons d'ailleurs que la part de l'uranium dans le coût de production de l'énergie électronucléaire est de l'ordre de 5 % – à comparer à celles du charbon et du gaz dans la production d'électricité thermique, qui dépassent les 50 % : la vulnérabilité de la filière nucléaire en est réduite d'autant.

Ainsi, plus que le pétrole et le gaz, l'énergie nucléaire est en mesure de garantir la sécurité de l'approvisionnement en électricité. En outre, l'uranium provient de sources diversifiées. Les principaux fournisseurs opèrent dans des pays politiquement stables. Les pays de l'OCDE ont approximativement 40 % des ressources d'uranium identifiées, ce qui est comparable au charbon, et bien supérieur à leur taux de détention des ressources en pétrole (de l'ordre de 7 %) ou en gaz (de l'ordre de 12 %).

Par ailleurs, les pays de l'OCDE sont autosuffisants pour les services essentiels allant de l'uranium au combustible fini : conversion, enrichissement et fabrication. Ainsi, la production électrique française est dans une large mesure (on pourrait dire quasi totalement) d'origine domestique.

Le fort potentiel énergétique du combustible, la stabilité de sa forme céramique et la faible part du combustible dans

le coût de production de l'électricité nucléaire font qu'il est usuel de conserver des réserves de combustible tout au long de la chaîne de fabrication. Ces réserves contribuent à assurer une très grande sécurité d'approvisionnement de la filière électronucléaire, en laissant un délai important (de plusieurs années) à la recherche d'une solution alternative, en cas de défaut d'une source.

Cependant, les stocks commerciaux excédentaires sont désormais proches de la résorption ; ceux des matières militaires réputés mobilisables sont, eux aussi, théoriquement bien connus et leur date de résorption se rapproche (2013, pour la plus grosse part). Cela impose que la production minière mondiale d'uranium rejoigne la demande et passe du niveau actuel (d'un peu plus de 40 000 t/an) à un niveau d'au moins 60 000 t/an. Le délai, pour ce faire, peut être estimé significativement à moins de 10 ans.

Les producteurs d'uranium, qui ont conscience de ce déficit, cherchent à accroître leurs capacités de production en consacrant de nouveaux investissements à la relance de la prospection (cf. la figure 6). Ainsi, les activités actuelles de prospection et d'ouverture de nouvelles mines sont intenses ; des projets très significatifs sont lancés tant au Canada qu'en Afrique (comme à Imouraren, au Niger) ou en Australie.

Ainsi, selon les projections actuelles, la capacité théorique de production minière atteindrait plus de 95 000 tonnes par an en 2015, contre 54 000 tonnes en 2007 (cf. la figure 8).

### L'évolution des prix de l'uranium

Il existe deux types de prix pour l'uranium : les prix dits *spot* provenant de négociations du minerai sur de courtes périodes (de 2 à 12 mois) et de faibles volumes (n'excédant généralement pas les cent tonnes) et les prix des contrats à long terme. Ainsi, en 2007, 30 % de l'uranium consommé était issu de sources secondaires (excédents commerciaux et surplus des stocks militaires), 15 % du marché *spot* et 55 % provenaient de transactions à long terme (la prospection ayant été stoppée pendant vingt ans, les fournisseurs préfèrent vendre sur le long terme).

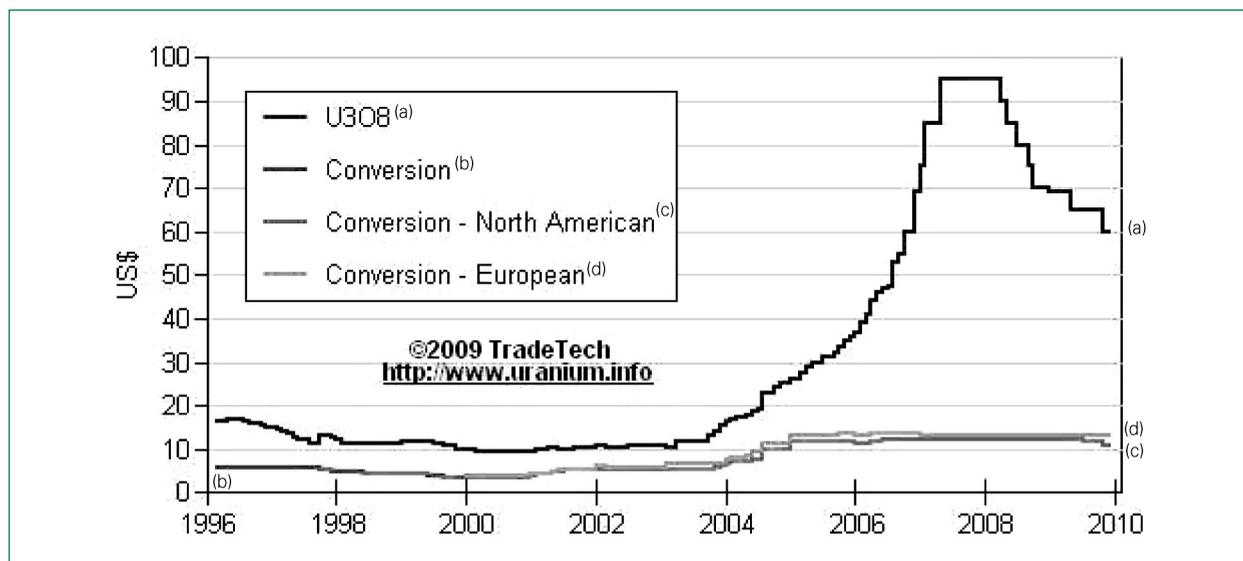


Figure 7 : Evolution du prix de l'uranium des contrats à long terme en dollars/livre d'oxyde U3O8.  
Source : Trade Tech.

Le prix de l'uranium a atteint un premier record historique dans les années 1970, sous l'effet de la demande d'uranium pour les besoins militaires et du développement de l'électronucléaire civil. Après une première chute en pente raide, il a amorcé un lent tassement, au cours des vingt dernières années, qui s'explique par le développement du nucléaire, plus lent que prévu à cette époque, et par une offre supérieure à la capacité, qui a entraîné l'accumulation de stocks importants. Ce prix est tombé à son niveau le plus bas en 2000, avant d'entamer une ascension jusqu'en 2008, à mesure que le marché prenait conscience de la réalité d'une pénurie potentielle de l'offre à court ou moyen terme, mais également à cause de spéculations, puis il a chuté significativement, les effets spéculatifs se dégonflant en 2008 et 2009, ce qui n'est pas sans lien avec la crise financière qui a affecté l'ensemble des marchés des matières premières (cf. la figure 7).

### Prospective de l'offre et de la demande jusqu'en 2030

À court terme, les besoins en uranium des réacteurs sont essentiellement déterminés par la puissance nucléaire installée, si bien que les besoins peuvent être prédits avec une certitude relative, le parc nucléaire étant bien connu (c'est l'inélasticité que nous avons évoquée plus haut). Les améliorations possibles dans le moyen et le long terme sont, pour l'essentiel, contenues dans les termes de la formule décrite au début de cet article : diminution de la teneur de rejet de l'opération d'enrichissement, augmentation du taux de combustion des réacteurs et recyclage des combustibles usés.

#### La diminution de la teneur de rejet de l'opération d'enrichissement

Lors du processus d'enrichissement de l'uranium naturel, on augmente la teneur de l'isotope  $^{235}\text{U}$ , de sa valeur initiale

(environ 0,7 %) à une valeur se situant entre 3,5 et 5 %, selon le type de combustible et le procédé utilisé. Pour une valeur d'enrichissement final souhaitée (par exemple de 4 %), le besoin en uranium naturel passe de 7,6 à 7 kg pour produire 1 kg d'uranium enrichi quand la teneur de rejet est ramenée de 0,20 à 0,15 %, soit un gain de 9 %. En pratique, les gains permis au cours des dernières années par le choix de teneurs de rejet plus faibles, liés à un prix de l'uranium à la hausse, sont de cet ordre.

#### L'augmentation du taux de combustion

L'augmentation, qui a été significative au cours du temps, du taux de combustion des combustibles permet, entre autres avantages, des économies sur la consommation d'uranium naturel, même si cette augmentation s'accompagne d'une augmentation de l'enrichissement en  $^{235}\text{U}$ . Le tableau 2 montre les ordres de grandeur de ces gains dans les conditions de gestion, typiques, de l'EPR, le passage de 45 à 60 GWj/t (toutes choses étant égales par ailleurs) permettant un gain d'environ 7 % d'uranium naturel. Ce phénomène s'est actuellement ralenti en France, car il est en concurrence avec d'autres phénomènes, tels que les besoins de flexibilité de la charge des réacteurs et de la gestion de leurs périodes d'arrêt. La tendance demeure, toutefois, et l'arrivée de nouveaux réacteurs devrait contribuer à la maintenir.

#### Le recyclage des combustibles usés

Les combustibles usés comportent un potentiel énergétique important, constitué par l' $^{235}\text{U}$  résiduel et le plutonium, celui-ci étant produit pendant l'irradiation de l'uranium. Leur recyclage, pratiqué couramment en France et dans plusieurs autres pays, est un moyen supplémentaire de réaliser des économies d'uranium naturel. Le recyclage s'intensifie actuellement : EDF est passé en début 2010 à 1 050 t/an (au

Taux de combustion	GWj/t	45	60
Enrichissement en <sup>235</sup> U	%	4	4,9
Uranium enrichi consommé	tonnes/TWhe	2,7	2,1
Uranium naturel consommé	tonnes/TWhe	22,3	20,8

**Tableau 2** : Comparaison des taux de combustion et des consommations d'uranium naturel entre réacteurs actuels (données de la colonne de gauche) et réacteurs EPR (données de la colonne de droite).

lieu de 850 t/an). Dans le monde, les pays intéressés sont de plus en plus nombreux, avec, récemment, la Chine, qui souhaite développer cette technique.

### *Le recyclage de l'uranium « de retraitement » (URT)*

Après irradiation dans le réacteur, l'uranium des combustibles UOX conserve un enrichissement légèrement supérieur à celui de l'uranium naturel. Typiquement, un combustible enrichi initialement à 4,7 %, avec un taux de combustion de 60 GWj/t, conserve un enrichissement résiduel en <sup>235</sup>U de 0,8 %. Cet uranium peut alors être ré-enrichi en vue d'une nouvelle utilisation en réacteur. Cette pratique est associée à une certaine pénalité, car, du fait de la présence des isotopes absorbants <sup>234</sup>U et <sup>236</sup>U, il est nécessaire de sur-enrichir légèrement le combustible. Les économies en uranium naturel permises par ce recyclage sont néanmoins de l'ordre de 10 %.

### *Le recyclage du plutonium*

Le plutonium produit durant l'irradiation des combustibles UOX peut être, selon la pratique courante en France et dans plusieurs autres pays, utilisé à son tour dans les combustibles MOX. A taux de combustion égal pour les deux types de combustible, le recyclage de la totalité du plutonium produit dans un parc d'un pays donné, dans un certain nombre de réacteurs, conduit à des économies d'uranium de l'ordre de 10 %.

Au total, un recyclage systématique de l'uranium et du plutonium permet de diminuer la consommation d'uranium d'environ 20 %.

### *Vers une meilleure gestion de l'uranium : le cas de l'EPR*

L'EPR permet, par rapport aux réacteurs du parc actuel, une meilleure utilisation de l'uranium naturel.

D'une part, ce réacteur est prévu pour porter le combustible à des taux de combustion élevés (de l'ordre de 60 GWj/t), ce qui conduit à une économie en uranium naturel (cf. le tableau 2). D'autre part, le dessin du cœur du réacteur apporte deux caractéristiques nouvelles allant dans le même sens :

- ✓ l'utilisation d'un cœur plus volumineux (241 assemblages, contre 205 pour le palier N4 à puissance sensiblement égale) se traduit par une puissance volumique plus faible et la possibilité d'accommoder des gestions du combustible de type faible fuite ;

- ✓ la présence, en périphérie du cœur, d'un baffle lourd qui améliore l'économie des neutrons et, par conséquent, permet une meilleure utilisation de l'uranium.

Ces deux aspects permettent une économie d'environ 10 % qui s'ajoutent aux gains permis par les taux de combustion visés, de 60 GWj/t.

Enfin, le rendement thermodynamique légèrement plus élevé (à noter que le rendement est d'autant meilleur que le réacteur est construit en pays froid) permet une économie supplémentaire de quelques pourcents.

### *Bilan global à l'horizon 2030*

Ainsi, à l'horizon 2030, de multiples voies sont possibles pour améliorer l'usage de l'uranium dans les réacteurs des parcs électronucléaires mondiaux. L'ensemble cumulé des effets décrits plus haut peut jouer raisonnablement sur une décre, d'un ordre de quelques dizaines de pourcents, de la demande d'uranium rapportée aux TWh d'électricité produits.

L'autre facteur qui gouvernera le marché est l'augmentation prévue de la puissance installée. Selon les projections de l'AEN, d'ici à 2030, la puissance nucléaire installée devrait s'accroître, passant d'environ 370 GWe nets au début de 2007 à environ 509 GWe nets (hypothèse basse, +38 %) ou à 663 GWe nets (hypothèse haute, +80 %). La demande respective en uranium serait alors de près de 95 000 t à 120 000 t d'uranium par an, dans l'hypothèse pessimiste d'une teneur de rejet de 0,3 %.

Les conditions du marché de l'uranium constituent le principal facteur motivant les décisions de mettre en place de nouveaux centres de production minière ou d'agrandir les centres existants.

La situation de l'offre et de la demande est en train d'évoluer rapidement, car la fermeté du marché incite à intensifier l'activité. Non seulement la demande devrait, selon les projections (cf. la figure 8), s'accroître jusqu'en 2030, mais des anticipations d'augmentation dynamique de la capacité théorique de production ont notablement modifié la relation entre l'offre et la demande que l'on a connue dans un passé récent, de sorte que même les besoins découlant du scénario de demande correspondant à l'hypothèse haute, pourraient être satisfaits jusque vers 2030, à condition que tous les centres de production (existants, commandés prévus et envisagés) soient mis en place et que la pleine capacité de production ait été atteinte. En revanche, la capacité théorique de tous les centres de production existants et commandés (en cours de développement) devrait satisfaire environ 90 % des besoins dans l'hypothèse basse,

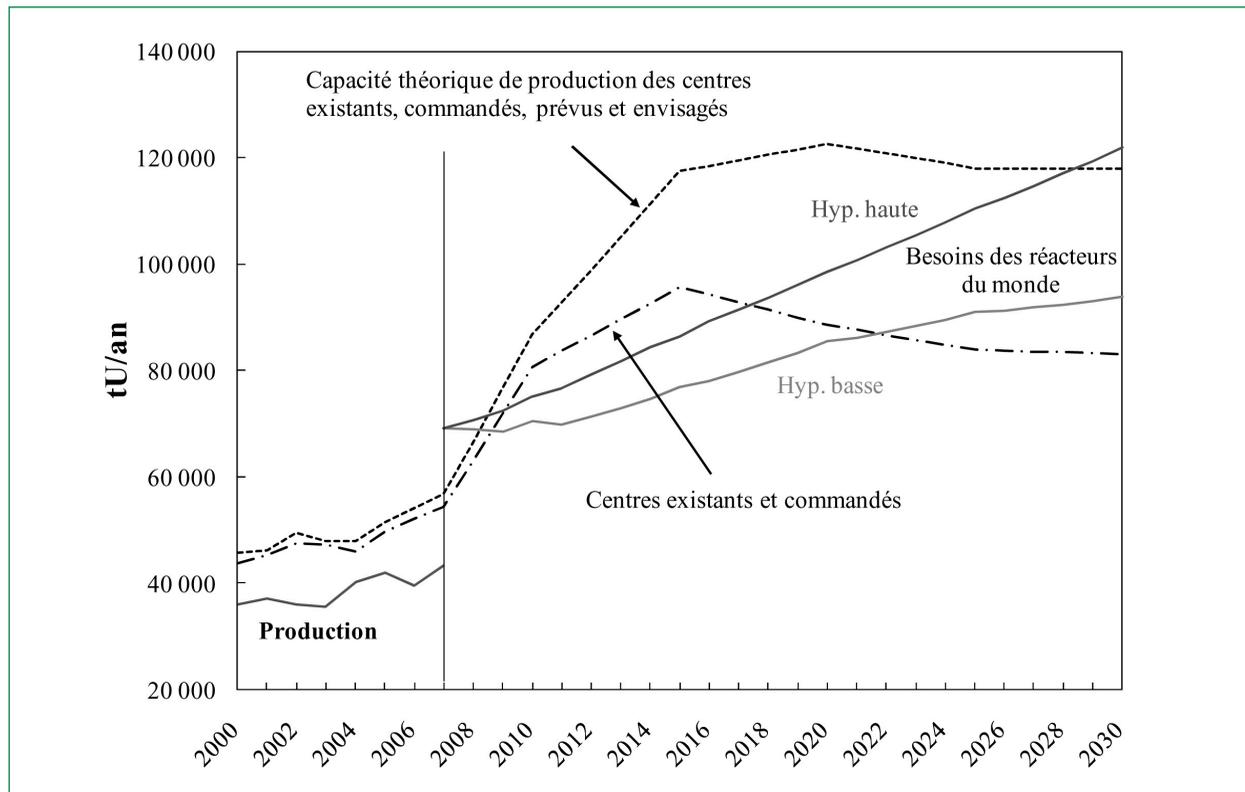


Figure 8 : Capacité de production d'uranium et besoins des réacteurs.  
Source : AIEA/OCDE 2008.

mais seulement un peu moins de 70 % dans l'hypothèse haute en 2030.

Face à ces chiffres, il est pertinent de rappeler que la production mondiale n'a jamais dépassé 90 % de la capacité théorique de production déclarée. Par conséquent, même si l'industrie minière a réagi vigoureusement au signal du marché que constituent des prix élevés, une production primaire supplémentaire et des approvisionnements secondaires seront nécessaires.

Au-delà de 2013 (environ), les sources secondaires d'uranium par déstockage devraient devenir moins disponibles, ce qui implique que les besoins des réacteurs devront être de plus en plus satisfaits par la production primaire. Inversement, les possibilités d'économie d'uranium décrites plus haut pourront se développer. Au total, le marché devrait s'accroître sans crise majeure. La tendance reste à des prix qui devraient s'établir durablement à des niveaux supérieurs à ceux relevés aux cours des deux dernières décennies : tant le coût d'accès aux ressources qui seront mobilisées que l'anticipation sur les marchés de long terme (les réacteurs nucléaires de dernière génération fonctionneront au minimum durant 60 ans) devraient maintenir les prix à des niveaux comparables au niveau actuel, voire à des niveaux significativement supérieurs, en fin de période.

### **Au-delà de 2030-2040 : valoriser l'uranium 238 via les réacteurs à neutrons rapides**

Même si les performances en termes de consommation d'uranium s'améliorent chaque jour, via le recyclage et la

mise en œuvre à court terme des réacteurs de 3<sup>e</sup> génération avec l'EPR, les performances décrites ci-dessus peuvent apparaître encore modestes, en termes d'utilisation de l'uranium naturel.

En outre, les tendances mises en évidence au paragraphe précédent vont se poursuivre au-delà de 2030 et les parcs de réacteurs nucléaires devraient continuer à s'accroître, ce mécanisme correspondant, d'une part, à l'accroissement de la production électrique et, d'autre part, à la volonté de développer des centrales émettant peu de gaz à effet de serre. La figure 9 montre que, autour de 2100, selon différents scénarios de croissance de la puissance nucléaire (d'origine IASA), les réserves totales au sens de l'OCDE et de l'AIEA, soit 15 millions de tonnes issues de ressources conventionnelles et 22 millions de tonnes extraites des phosphates, devraient être épuisées. Mais la seconde courbe montre que les réacteurs construits vers 2050 engageront déjà des réserves d'uranium fortement spéculatives : ainsi, c'est dès le milieu du siècle qu'il faudra disposer de techniques qui soient capables de détendre ces tensions annoncées.

Le niveau actuel des connaissances technologiques permet d'ores et déjà d'anticiper qu'à un terme de quelques décennies, il sera possible d'utiliser la quasi-totalité de l'<sup>238</sup>U, via la mise en service graduelle de réacteurs à neutrons rapides (RNR). Ces réacteurs permettent, en effet, bien mieux la transmutation de l'<sup>238</sup>U en <sup>239</sup>Pu, un isotope dont la fission est plus facile à obtenir.

Les travaux de recherche et développement portant sur cette « filière RNR » sont notamment mis en œuvre par le

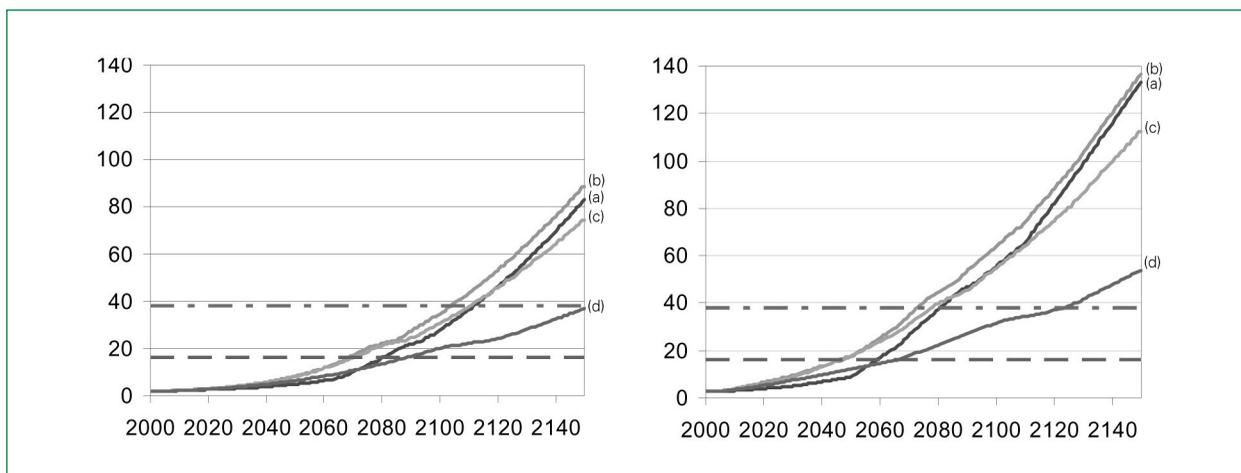


Figure 9 : Consommation des réserves d'uranium (à gauche) et engagement de ces mêmes réserves (à droite).

Scénarios : 1: IIASA A2 (a) 2: IIASA A3 (b) 3: IIASA B (c) 4: IIASA C2 (d).

Source : CEA/I-tésé 2009.

CEA, en étroite collaboration avec l'industrie. Ils devront permettre, dans un premier temps, de concevoir un prototype (ASTRID), qui sera construit sur le sol français d'ici une dizaine d'années. Les objectifs portent tant sur son degré d'innovation que sur l'amélioration de la sûreté et sur sa capacité à préfigurer la filière nucléaire du futur.

Via cette technologie, les stocks d'uranium appauvri disponibles, en combinaison avec les combustibles usés contenant du plutonium, permettront, à partir du siècle prochain, de s'affranchir totalement des mines d'uranium et ce, pendant plusieurs millénaires : l'on valorisera, dès lors, les 99 % de l'uranium extrait mis actuellement de côté. De surcroît, la radio-toxicité des actinides mineurs (des éléments radioactifs présents dans les combustibles nucléaires usés) pourra être diminuée grâce à leur transmutation en réacteur, réduisant ainsi la toxicité des colis de déchets à stocker.

Mais qui dit optimisation des ressources et économies d'uranium dans les systèmes du futur à neutrons rapides pose la question de la disponibilité du plutonium. En effet, cet élément doit être introduit dans le combustible des systèmes du futur, ce qui en fait un enjeu fort pour un déploiement d'importance des RNR. Les calculs de l'Institut de technico-économie (I-tésé) du CEA montrent que, selon les scénarios de croissance du nucléaire envisagés, les quantités de plutonium accessibles via le recyclage des combustibles usés des réacteurs à eau permettraient d'installer de l'ordre de 2 TWe de puissance nucléaire RNR en 2100 (soit 5 fois plus que le total de la puissance actuelle). Si la puissance de cette époque est encore plus élevée, ce qui apparaît dans certains scénarios, il faudra alors probablement tabler sur une coexistence des deux filières REL et RNR au-delà du tournant de ce siècle, voire recourir à des cycles nouveaux, tel que le cycle nucléaire basé sur le thorium.

### Au-delà des réacteurs à fission : la fusion nucléaire et les besoins en lithium

A plus long terme, on envisage de nouveaux types de réacteurs nucléaires basés sur la réaction de fusion d'iso-

topes de l'hydrogène (deutérium et tritium). La fusion nucléaire consommerait 3 tonnes de lithium par an et par GWe (pour produire le tritium), soit de l'ordre de 0,01 % de la production annuelle actuelle de lithium (sans compter les premières charges en lithium des couvertures tritigènes).

Les ressources en lithium sont estimées entre 17 et 30 millions de tonnes (suivant les sources), les réserves exploitables en 2008 étant comprises entre 4 et 16 millions de tonnes. Dans l'hypothèse (très « majorante ») d'une couverture de la totalité de la production nucléaire mondiale par des réacteurs à fusion, les gisements miniers en lithium seraient épuisés au bout de 5 000 ans. Ce sont donc plutôt les autres usages de cet élément qui détermineront les tensions sur les réserves. L'extraction du lithium de l'eau de mer pourrait (il en va d'ailleurs de même en ce qui concerne celle de l'uranium) repousser d'éventuelles limites hors de la vision humaine (à l'horizon de plusieurs millions d'années).

Le problème est moins la quantité de la ressource en lithium disponible que sa disponibilité. En effet, les ressources en lithium sont, pour plus de 70 %, situées dans le « triangle du lithium », dans les salars andins du Chili, de la Bolivie et de l'Argentine. La production de lithium a été en 2008 de 22 800 tonnes. Quatre pays se sont partagé 93 % du marché : le Chili (12 000 tonnes), l'Argentine (3 200 tonnes), l'Australie (6 900 tonnes) et la Chine (3 500 tonnes) (Source : US Geological Survey). De surcroît, l'usage du lithium peut se tendre notablement avec les besoins d'industries telles que la production d'accumulateurs électriques : ces marchés se développent actuellement, en forte avance de phase par rapport à la fusion nucléaire.

### Conclusion

Aujourd'hui, le parc nucléaire mondial est constitué en majorité de réacteurs à eau légère (REL), très sûrs et compétitifs. Cependant, l'efficacité dans l'utilisation des ressources est un indicateur fondamental du développement durable dans le secteur de l'énergie.

La dépendance du nucléaire actuel vis-à-vis de la disponibilité en uranium peut être qualifiée de faible. D'une part, les coûts de cette ressource sont modestes au regard du coût de production de l'électricité, d'autre part, des stocks stratégiques existent et, enfin, les ressources sont importantes. En effet, la connaissance actuelle des ressources en uranium et les perspectives de développement du nucléaire montrent que les seules ressources formellement identifiées (raisonnablement assurées) permettent près d'une centaine d'années de fonctionnement du parc à son niveau actuel, ce qui est une bonne performance, par rapport à d'autres énergies.

Le nucléaire est toutefois appelé à se développer fortement. Nous avons passé en revue les principales directions des progrès techniques qui permettront de continuer à diminuer la quantité d'uranium consommée par TWh d'électricité produit. La France est le leader mondial concernant nombre d'entre elles (notamment le recyclage des combustibles usés). A l'horizon de quelques dizaines d'années, les améliorations de la gestion de l'uranium dans les réacteurs à eau pourraient ainsi permettre de gagner encore plusieurs dizaines de pourcents dans ce domaine.

Au-delà, il faudra faire mieux que se contenter de ne consommer que moins de 1 % de l'uranium naturel extrait. Il faudra donc faire évoluer le parc et remplacer les REL par des réacteurs utilisant beaucoup mieux l'uranium naturel, comme les réacteurs à neutrons rapides (RNR) (qui peuvent produire de l'ordre de 100 fois plus d'énergie avec la même

quantité d'uranium naturel). Les défis à relever par ces RNR sont principalement ceux de la sûreté et de l'économie. Notons que si leur coût d'investissement apparaît aujourd'hui plus élevé que celui des REL, c'est justement un prix de l'uranium naturel suffisamment haut qui les rendra compétitifs... un prix qui sera atteint avec la raréfaction graduelle des ressources naturelles. Un développement important de ces réacteurs est prévu vers la moitié de ce siècle. Le CEA travaille activement à leur mise au point avec ses partenaires, dans le cadre de la loi française du 28 juin 2006 et ce, en coopération avec de nombreux pays.

A plus long terme, des possibilités alternatives sont actuellement en cours de développement *via* la fusion nucléaire, attendue pour la fin de ce siècle. Si la réussite de cette grande aventure scientifique et technologique ne peut être assurée, nous savons déjà que cette filière ne devrait pas rencontrer d'obstacle significatif en termes de disponibilité de sa ressource principale, le lithium.

Au total, un développement important du nucléaire, attendu pour faire face aux enjeux environnementaux très forts qui sont les nôtres, ne devrait pas être significativement limité par les ressources disponibles, grâce à des choix technologiques appropriés. Une des missions du CEA est d'y contribuer en très bonne place.

#### Note

\* Administrateur général du CEA.

## Biocarburants : quel potentiel de développement ?

**Les limites des filières actuelles de production de biocarburants de première génération sont réelles. Afin de pallier ces limites, les efforts se concentrent sur le développement de procédés permettant la conversion en carburant de ressources végétales peu valorisées. Ces travaux de recherche portent aussi bien sur la ressource que sur les technologies et procédés de transformation en carburant.**

par Nathalie ALAZARD-TOUX\*

Encensée au début des années 2000, puis, plus récemment, dénoncée, la production mondiale de biocarburants a connu une croissance annuelle très importante, de l'ordre de 20 à 30 %.

Pour les trois quarts, cette production prend la forme d'éthanol, produit essentiellement aux États-Unis et au Brésil (zone historique de production et de consommation, depuis le plan Proalcool lancé dans les années 1970 par le gouvernement brésilien). En 2008, ces deux pays ont représenté 90 % de la production et 80 % de la consommation mondiales d'éthanol.

Le biodiesel, dont la part relative dans la production mondiale de biocarburants est passée de 10 % au début de la décennie à près du quart en 2008, reste globalement une spécificité européenne : en 2008, 60 % du biodiesel mondial ont été produits en Europe et 80 % ont été consommés dans cette même région.

L'accroissement de la production de biocarburants au cours de la première décennie de ce siècle découle essentiellement de la volonté des gouvernements de diminuer la dépendance du transport routier vis-à-vis du pétrole et ce, dans un contexte d'interrogation quant au potentiel de renouvellement des réserves, ainsi, à partir de 2003, qu'au sujet de l'augmentation continue du prix du baril de pétrole. En 2002, les carburants issus du pétrole constituaient 98 % de l'énergie utilisée par le transport routier, maritime et aérien, et la demande de mobilité ne cessait de s'accroître partout sur la planète. En outre, les filières biocarburants étaient mises en avant pour leur bilan « gaz à effet de serre » plus intéressant que celui des carburants traditionnels (nous reviendrons sur ce point ultérieurement).

L'Europe, les États-Unis, bien sûr, mais aussi beaucoup d'autres pays, se fixent des objectifs en matière d'accroissement de la part des biocarburants dans leur mix global de carburants, instaurant même, pour certains d'entre eux, des taux d'incorporation obligatoires. Ainsi, l'Union européenne s'est fixée, en 2003, un objectif de 5,75 % de biocarburant à l'horizon 2010 et, plus récemment, un taux minimal de 10 % d'énergie renouvelable pour les transports en 2020. Les États-Unis se sont également donné une cible à

atteindre d'ici à 2022, via leur *Energy Independence and Security Act*, qu'ils ont adopté en 2007.

### Les limites des filières actuelles

La première génération de biocarburants (voir la figure 1) désigne ceux qui sont produits actuellement à partir de ressources agricoles alimentaires : l'éthanol (obtenu à partir de plantes sucrières, comme la canne à sucre ou les betteraves sucrières, ou de plantes amyloacées, telles que le blé et le maïs) et les Esters Méthyliques d'Huile Végétale (EMHV) produits à partir d'huiles de colza, de tournesol, de soja, ou même de palme.

Le développement rapide et sur une grande échelle de ces substituts aux carburants pétroliers, issus de la transformation d'une matière première agricole, ne va pas sans poser un certain nombre de problèmes, comme l'ont montré les débats récents.

### *L'entrée en compétition des agro-carburants avec l'agro-alimentaire*

Ce développement des agro-carburants se heurte, tout d'abord, au problème de leur entrée en compétition avec les cultures à vocation alimentaire dans l'utilisation des terres agricoles. Si l'on fait l'hypothèse que la production agricole européenne consommée sur zone et la consommation en carburants routiers restent inchangées, on évalue aujourd'hui au maximum à 7 % la part que les biocarburants de première génération européens pourraient représenter dans l'approvisionnement global de l'Europe en carburants routiers. Au-delà de cette proportion, la production de biocarburants entrerait en compétition avec l'utilisation agro-alimentaire des terres arables nécessaire à l'Europe.

Plus globalement, un rapport récent du Programme des Nations Unies pour l'Environnement [1] estime qu'avec les filières biocarburants actuelles et en prenant en compte la croissance de la population mondiale, ce sont de 8 à 34 % des terres cultivables de la planète qui seraient nécessaires

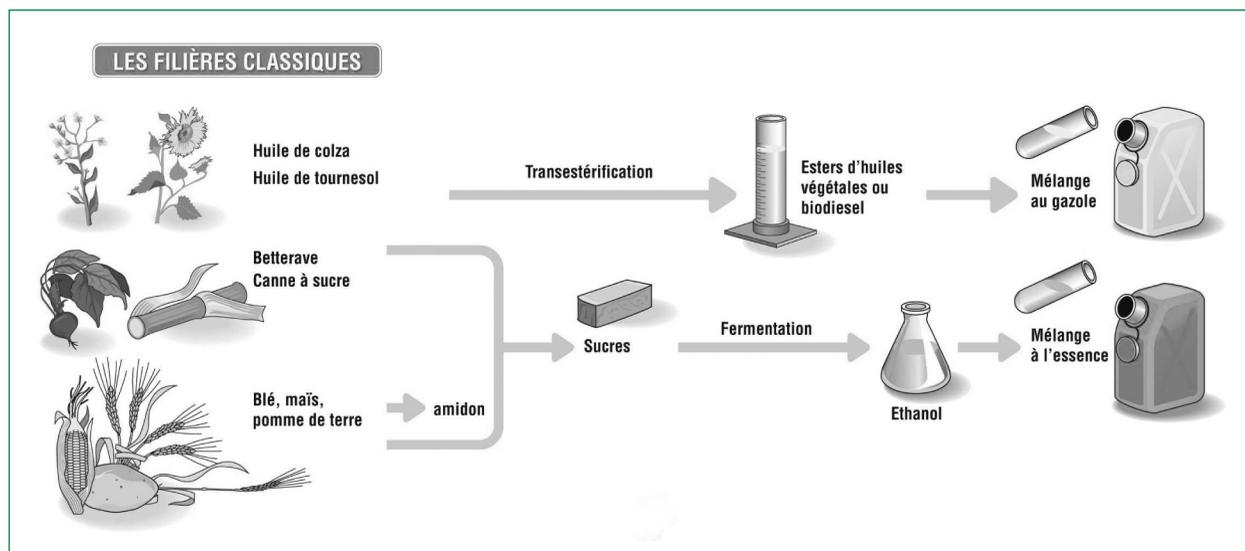


Figure 1 : Les filières de première génération de production de biocarburants.

pour couvrir 10 % de la demande mondiale en carburants à l'horizon 2030.

Le développement des biocarburants de première génération est également accusé de peser sur les prix des matières premières agricoles utilisées à cette fin, qui sont susceptibles d'être associés aux cours du pétrole. Une telle corrélation a d'ailleurs été observée entre les cotations du pétrole et celles du maïs aux Etats-Unis, sur la période 2003-2008 [2]. Il s'agit là d'un phénomène n'ayant rien pour nous surprendre, dès lors qu'en 2007 c'est plus de 30 % de la récolte américaine de maïs qui ont alimenté la filière éthanol nationale.

Faut-il cependant attribuer à la seule expansion des carburants d'origine végétale l'augmentation des prix de nombreuses matières premières agricoles sur la période 2003-2008 ? Cela paraît excessif. D'autres causes ont fortement contribué à l'accroissement des cours : le nombre plus important d'événements climatiques extrêmes (sécheresses ou fortes pluies) dans des zones de production n'a pas été sans conséquence ; l'accroissement des importations de pays émergents a également joué un rôle. Plus généralement, la période a été marquée par une forte augmentation des prix de l'ensemble des matières premières.

### Les interrogations sur les bilans gaz à effet de serre

Ces dernières années, les bilans gaz à effet de serre (GES) des filières biocarburants de première génération ont aussi fait l'objet de nombreux débats, alimentés par les résultats (parfois très différents) des multiples études publiées sur le sujet. Toutefois, du point de vue qualitatif, les conclusions de ces études vont toutes dans le même sens : elles s'accordent à dire que l'usage des biocarburants permet de réduire de manière significative les émissions de gaz à effet de serre par rapport aux carburants pétroliers, dès lors qu'aucun changement n'intervient dans l'utilisation des sols : c'est là une précision importante (sur laquelle nous reviendrons).

Les écarts observés entre ces études [3] sont principalement dus à la méthodologie de calcul retenue et aux données sélectionnées pour établir les bilans (quantités d'engrais utilisées, rendements des cultures agricoles et des procédés de conversion, etc.).

Sur le plan méthodologique, une hypothèse particulièrement déterminante est celle relative au mode de prise en compte des coproduits. En effet, la production de biocarburants s'accompagne d'une quantité importante de coproduits de natures diverses : en moyenne, deux tonnes de coproduits par tonne de biocarburant. A titre d'exemple, la production de biodiesel à partir d'huile végétale de colza entraîne celle de pailles, de tourteaux et de glycérine, qui ont eux-mêmes des débouchés industriels. Certaines études ignorent ces coproduits et affectent l'intégralité des émissions de GES et des consommations d'énergie au seul biocarburant, mais la grande majorité des travaux les comptabilise. Quand ces coproduits des agro-carburants sont pris en compte, il convient de faire un choix quant au mode de répartition des émissions de gaz à effet de serre entre les différents produits. Une méthode possible, pour ce faire, consiste à affecter les impacts GES étudiés aux différents produits, par exemple au prorata de leur masse, de leur contenu énergétique ou encore de leur valeur économique. Une seconde méthode, dite « des impacts évités », consiste à affecter (dans un premier temps) l'intégralité des impacts GES au seul biocarburant, puis à retrancher de cette valeur, un « crédit » correspondant aux impacts qu'aurait générés la production de la même quantité de coproduits par la voie classique. A titre d'exemple, si l'on considère que la glycérine coproduite lors de la synthèse d'EMHV se substitue à une glycérine produite par l'industrie chimique, on utilisera le bilan de cette filière pour calculer le crédit de GES à allouer au biodiesel. A l'heure actuelle, si la question de l'affectation des impacts fait toujours l'objet de débats, il est clair que le choix d'une méthode est intimement lié aux objectifs que l'on s'est fixés, ainsi qu'au contexte dans lequel le calcul est fait.

Au-delà de ces questions de méthodologie, les problèmes de changement d'affectation des sols peuvent également fortement peser sur les bilans. Un développement des biocarburants se faisant (directement ou indirectement) au détriment de terres occupées par des forêts ou des prairies, qui sont de véritables systèmes de stockage de carbone, peut entraîner d'importants rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (non sans entraîner une destruction éminemment problématique de zones présentant une riche biodiversité).

Globalement, ces dernières années, les débats ont souligné à quel point il est important de promouvoir le développement des filières de production de biocarburants les plus intéressantes du point de vue environnemental ; peu à peu, les objectifs nationaux retenus par les différents pays ont intégré cette dimension.

Dans sa directive d'avril 2009 sur la promotion de l'utilisation de l'énergie produite à partir de ressources renouvelables (intégrée au paquet Énergie-Climat), l'Union européenne se fixe, pour la consommation d'énergie par les transports, un objectif de 10 % en 2020, non plus de biocarburants, mais – le vocabulaire est ici très important – en énergies renouvelables au sens large (c'est-à-dire en biocarburants, en électricité et en hydrogène obtenus de manière renouvelable). Cette directive introduit, en outre, des critères de durabilité pour les biocarburants. Le respect de ces critères, qui concernent tous les volumes consommés en Europe (qu'ils aient été produits dans la zone ou importés), conditionne la prise en compte de chaque filière et la comptabilisation des quantités produites dans les objectifs nationaux. Parmi ces critères figure un seuil minimum de réduction des émissions de GES « du puits à la roue » par rapport aux carburants fossiles. Ce gain doit être d'au moins 35 % pour toute nouvelle installation à partir de 2013, puis de 50 % pour toute installation existante, en 2017 et, enfin, après 2017, de 60 % pour toute nouvelle installation.

Afin de mesurer ce gain, une méthodologie de calcul a été définie et des valeurs de référence des bilans GES représentatives des pratiques de chaque filière de production ont été établies. La méthodologie retenue par la directive est celle d'une répartition des impacts entre produits et coproduits, au prorata de leur contenu énergétique.

A l'examen des valeurs de référence imparties par la directive aux différentes filières de première génération (voir la figure 2), on constate que les filières les plus représentatives des pratiques européennes actuelles respectent le seuil des 35 %, mais qu'elles pourraient avoir plus de difficultés à franchir les seuils des 50 et 60 %. Les filières de production d'EMHV à partir d'huiles importées (de soja et de palme) sont moins bien positionnées que les autres, à cet égard.

### **Une variable d'ajustement permettant d'équilibrer l'offre et la demande de carburants**

Si les deux dernières années ont été marquées par une vision plus critique des biocarburants, notamment avec les débats portant sur l'impact de leur développement sur les

prix des matières premières agricoles ou sur les gains réels en termes de GES, les biocarburants resteront, à long terme, une composante significative de l'adéquation de l'offre à la demande d'énergie du secteur des transports. Dans son dernier scénario de référence, l'AIE [4] fait état d'une production mondiale de 133 Mtep de biocarburants, représentant quatre fois la production de 2008 (en équivalent énergétique) à l'horizon 2030. Si leur croissance a connu un très fort ralentissement en 2009, en raison de la crise économique mondiale, les biocarburants sont encore considérés comme une source incontournable d'énergie pour le secteur transport dans les années à venir.

Dans le scénario de l'AIE limitant à 450 ppm la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, la production de biocarburants devrait être en 2030 huit fois supérieure à celle relevée en 2008 ; elle devrait être assurée par les filières de deuxième génération (qui permettent la production d'éthanol ou de gazole de synthèse à partir de biomasse lignocellulosique – bois, paille, déchets forestiers et agricoles etc.) à hauteur de 60 % (dans le scénario de référence de l'AIE, le développement des filières de deuxième génération semble également incontournable).

### **Les filières de deuxième génération**

Les limites des filières actuelles de production de biocarburants de première génération sont réelles. Afin de pallier ces limites, les efforts se concentrent sur le développement de procédés permettant la conversion en carburant de ressources végétales peu valorisées. La transformation de la lignocellulose des plantes élargit le spectre des espèces valorisables en carburants à des végétaux non alimentaires pouvant, en outre, offrir des rendements à l'hectare nettement plus importants.

Par l'expression « filière de deuxième génération », l'on distingue (voir la figure 3) deux modes de conversion [5].

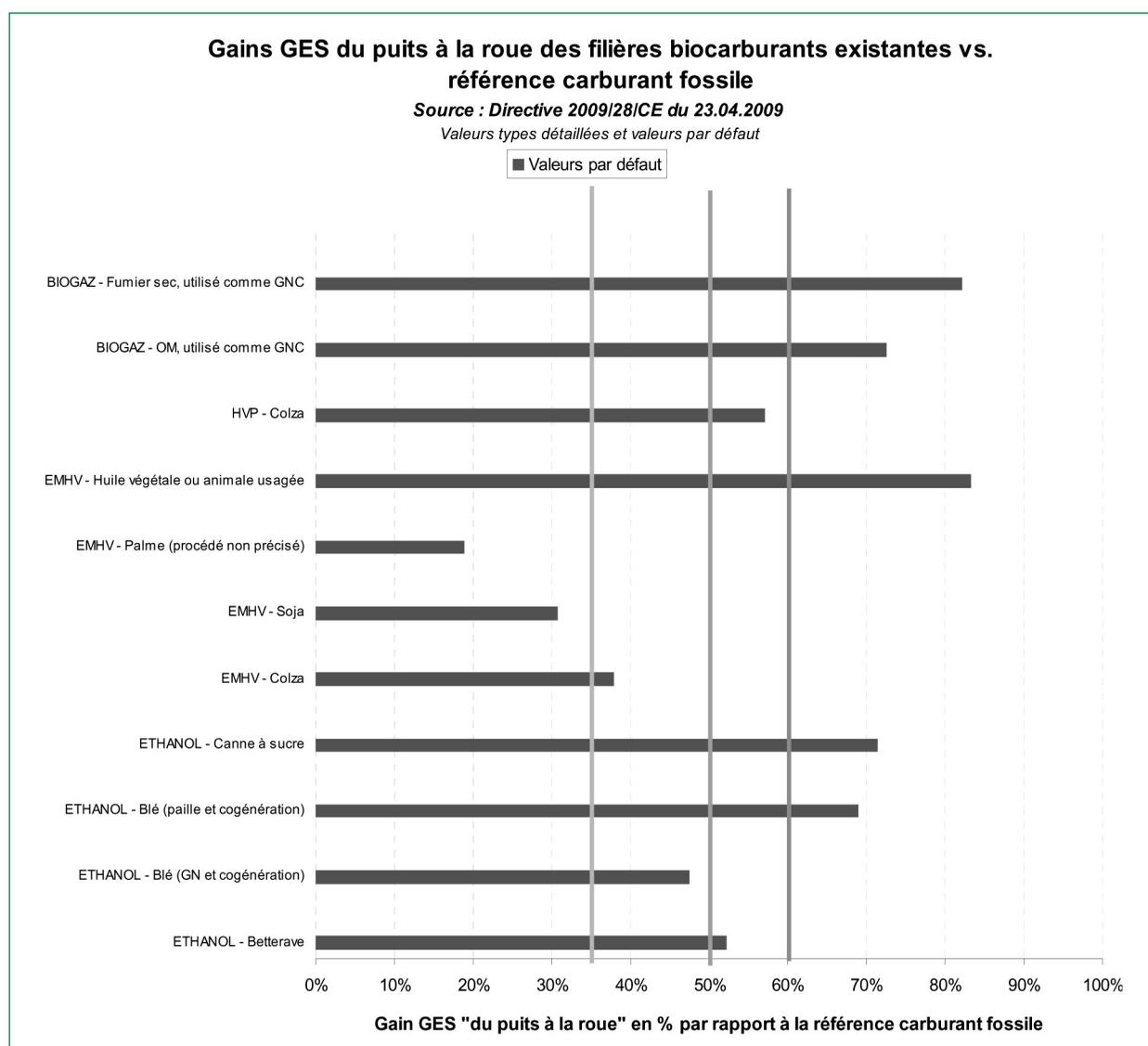
Le premier de ces deux modes, appelé « conversion biochimique », produit de l'éthanol par la fermentation des sucres contenus dans la lignocellulose.

Le deuxième mode, appelé « conversion thermochimique », englobe deux technologies :

- ✓ la « conversion thermochimique voie indirecte » consiste à gazéifier la biomasse et à obtenir ensuite, par synthèse « Fischer-Tropsch », du gazole de synthèse d'excellente qualité (pouvant être utilisé directement dans les moteurs diesel), du kérosène (pour l'aviation) et du naphta (pouvant être utilisé comme matière première par la pétrochimie ou, éventuellement, pouvant servir à produire de l'essence) ;
- ✓ la « conversion thermochimique voie directe » consiste en une liquéfaction hydrothermale de la biomasse permettant l'obtention d'un « bio brut », dont peut être extraite une fraction légère transformable en gazole.

#### *Leur intérêt sur le plan de la ressource*

Ces filières présentent un réel intérêt pour accroître le potentiel de production mondiale de biocarburants, même



**Figure 2 :** Gains GES du « puits à la roue » des filières biocarburants existantes par rapport à celles d'un carburant fossile dit de référence.

s'il est difficile d'évaluer avec précision les volumes de biomasse mobilisables à terme.

Basés sur le recensement de données publiées dans différentes études régionales, des travaux récents ont conduit à une première estimation du potentiel mondial. Deux types de ressources ont été distingués : des ressources de type « sous-produits » (résidus d'exploitations forestières et de l'industrie du bois, de récoltes agricoles, etc.) et des ressources de type « biomasse dédiée » (cultures dédiées sur des surfaces non forestières, non exploitées aujourd'hui). Les résultats indiquent un potentiel annuel global de matière sèche de l'ordre de 3 800 à 4 500 Mt [6], avec des fourchettes plus ou moins larges selon les régions. Si toute cette biomasse était collectée et transformée en biocarburants, à l'horizon de 20 à 30 ans, 20 % des carburants traditionnels pourraient être remplacés par des biocarburants de 2<sup>e</sup> génération.

Il s'agit là d'une valeur haute, car une partie de cette biomasse sera très vraisemblablement utilisée pour d'autres usages, notamment énergétiques.

### *Leur intérêt en termes d'émissions de gaz à effet de serre*

Les filières de 2<sup>e</sup> génération présentent des gains potentiellement plus importants en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Développées de manière raisonnée, elles satisfont les seuils de 50 % et 60 % de réduction de GES fixés par l'Union européenne à l'horizon 2017 et au-delà (voir la figure 4).

Il faut toutefois souligner que la durabilité de ces filières dépendra fortement du mode d'exploitation de la biomasse. Le problème du changement d'affectation des sols pourrait également se poser, pour les filières de 2<sup>e</sup> génération.

### *Un impact potentiellement moindre sur les ressources en eau*

D'une manière générale, la valorisation de biomasse lignocellulosique de type résidus (forestiers ou agricoles)

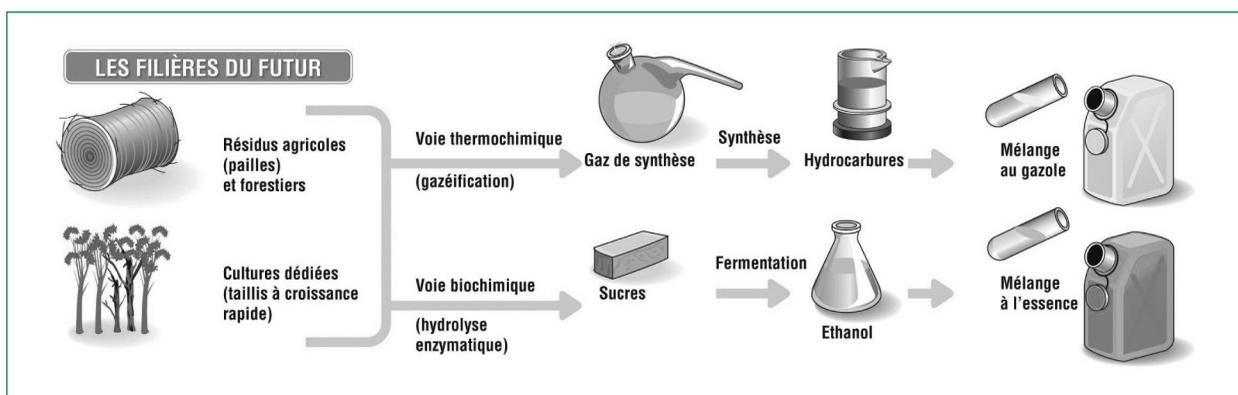


Figure 3 : Les filières de deuxième génération.

permet une réduction significative de l'empreinte environnementale tant en termes d'émissions de GES dans l'atmosphère que d'impacts locaux (notamment sur la ressource en eau). La production par transformation de cultures lignocellulosiques dédiées peut également avoir un impact moindre sur la ressource hydrique.

Une étude [7] menée par l'IFP et l'Université de Bordeaux, en partenariat avec l'IDDRI et les Agences de l'eau Seine-Normandie et Adour-Garonne, ainsi que par les

sociétés Veolia et Total, a été réalisée récemment afin d'évaluer l'impact de différents scénarios de développement des biocarburants sur la ressource en eau de deux bassins hydrographiques : le bassin de Seine-Normandie et celui de l'Adour-Garonne.

L'un des principaux résultats est que le développement, pour la France, d'un scénario 2030 prévoyant 14 Mtep de biocarburants *via* des filières de 2<sup>e</sup> génération peut être envisagé sans réel impact (par comparaison à aujourd'hui)

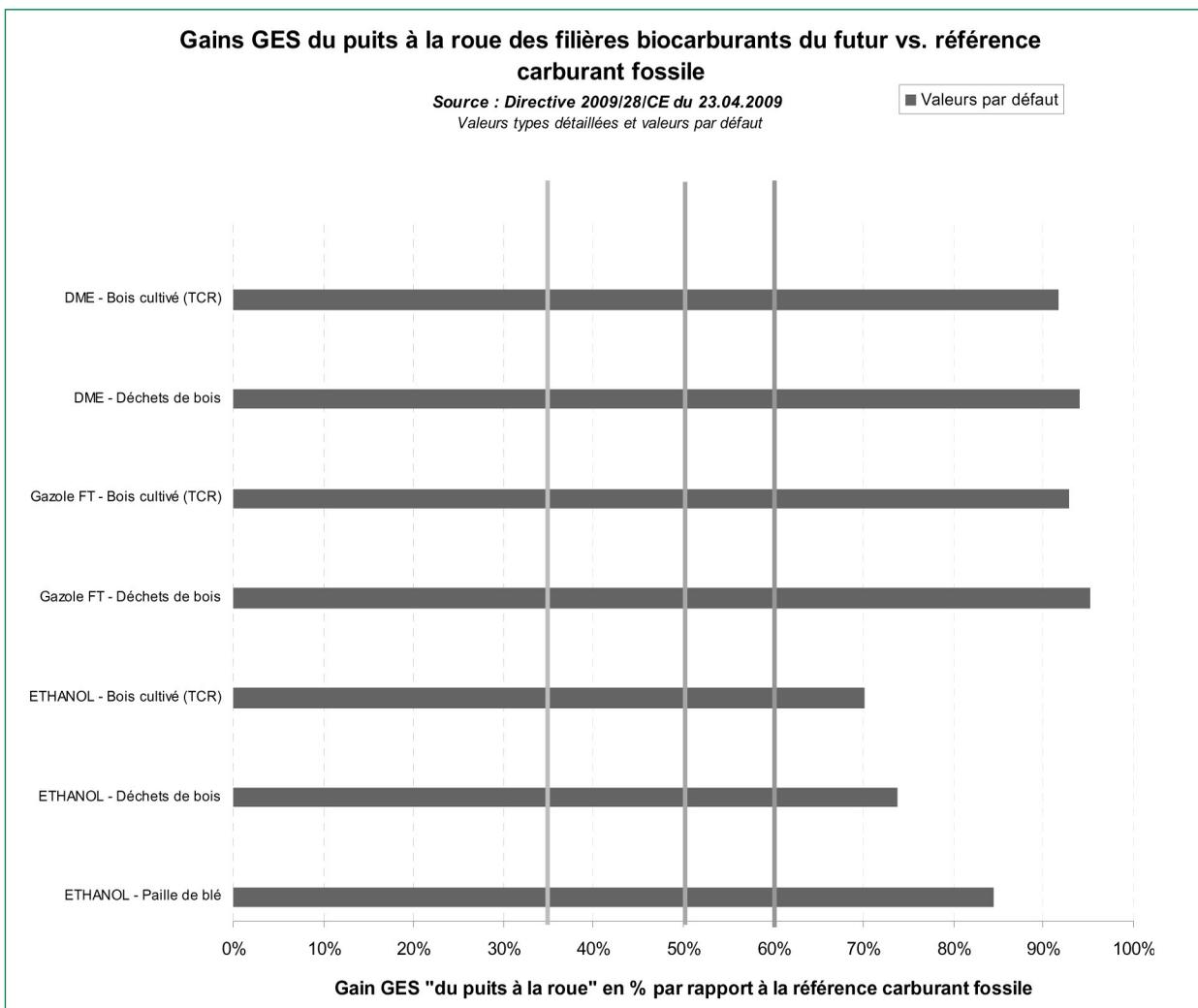


Figure 4 : Gain GES du « puits à la roue » des filières biocarburants du futur par rapport à celles d'un carburant fossile dite de référence.

sur la ressource en eau tant en termes de quantités prélevées qu'en termes de modification de la qualité (contamination des eaux de surface et des eaux souterraines, présence de nitrate, etc.). Ce scénario fait appel à des cultures lignocellulosiques dédiées produites sans irrigation. Des cultures du même type, mais irriguées, donnent une production plus élevée (20 Mtep au lieu de 14), mais elles accroissent la pression sur la disponibilité en eau par rapport à la situation prévalant aujourd'hui.

Autre scénario examiné : le développement de seulement 5 Mtep de biocarburants *via* les filières de première génération a un impact négatif significatif.

### *Quels coûts, pour ces filières ?*

Les biocarburants de deuxième génération présentent cependant aujourd'hui des coûts qui sont bien supérieurs à ceux des filières de première génération, elles-mêmes plus coûteuses que l'essence et le gazole, même aux niveaux de prix élevés récemment observés.

A quantité d'énergie équivalente, le surcoût (hors taxes), par rapport à l'essence, de l'éthanol produit en Europe ou aux États-Unis est de 50 à 80 %. Au Brésil, où les coûts de production sont plus faibles, l'éthanol est compétitif par rapport à l'essence. En 2008, les automobilistes brésiliens ont consommé autant d'éthanol que d'essence.

Quant au biodiesel, son surcoût par rapport au gazole, bien qu'un peu plus faible, reste également important (de l'ordre de 30 à 75 %).

Le développement des ventes de ces produits observé depuis 2000 s'est opéré grâce aux soutiens publics : défiscalisation à la vente, soutien (direct ou indirect) à la production des matières premières ou à l'investissement dans les unités de fabrication et, plus récemment, obligation d'incorporation dans les carburants.

Au stade actuel des travaux d'évaluation, les coûts de production des biocarburants de deuxième génération restent encore plus élevés : en moyenne (hors-taxes), ils correspondent à deux fois ceux du gazole et de l'essence tirés du pétrole. Les espoirs de voir se réduire ces écarts dans le futur sont cependant réels, avec l'augmentation probable du prix du pétrole dès que la consommation repartira et, surtout, avec les gains d'efficacité et de rentabilité attendus grâce aux efforts de recherche et de développement déployés pour ces nouvelles filières.

Ces travaux de recherche portent aussi bien sur la ressource que sur les technologies et procédés de transformation en carburant.

Ils visent à identifier les espèces (*Miscanthus*, *Switchgrass*, taillis à courte rotation...) présentant un intérêt dans le cadre de cultures dédiées, à définir les itinéraires techniques à pratiquer sur ces cultures ou encore les potentialités d'amélioration génétique de ces plantes. Ils cherchent également à optimiser chaque étape de la transformation du point de vue économique.

Pour la conversion biochimique, les différentes méthodes de prétraitement de la biomasse sont étudiées,

ainsi que leur adaptation aux différentes espèces végétales. On cherche à optimiser l'hydrolyse de la cellulose en sucre (et éventuellement celle de l'hémicellulose), ainsi que l'augmentation du rendement en éthanol lors de l'étape de fermentation.

En ce qui concerne la conversion thermo-chimique *via* la formation d'un gaz de synthèse, si les procédés sont bien connus pour le traitement des charges fossiles, la transformation de la biomasse implique de nouvelles contraintes : l'étape de prétraitement (pyrolyse ou torréfaction) fait l'objet de recherches, ainsi que les solutions permettant une épuration poussée des gaz, une optimisation du rapport  $H_2/CO$  ou encore la diminution du taux de gaz inertes. Des systèmes permettant d'améliorer le rendement massique de la chaîne de transformation au moyen d'apports externes (d'énergie ou d'hydrogène) sont également étudiés.

La faisabilité de la conversion thermo-chimique par voie indirecte a seulement été démontrée en laboratoire. Elle reste à être vérifiée à plus grande échelle.

Ces technologies en sont aujourd'hui à des stades de maîtrise et de développement contrastés. L'expérimentation par des pilotes et des démonstrateurs reste une étape incontournable pour lever les verrous restants. De nombreux projets allant dans ce sens sont lancés en Amérique du Nord, en Europe, au Brésil et au Japon.

Aux États-Unis, les projets d'unités pilotes ou de démonstrateurs et les annonces d'unités commerciales concernent essentiellement la conversion biochimique, voie privilégiée par ce pays consommateur d'essence, tandis qu'en Europe, où la diésélisation du parc automobile n'a fait que s'accroître, les deux voies biochimique et thermo-chimique sont développées en parallèle. Si la crise économique a fortement ralenti les annonces de projets d'unités pilotes ou commerciales, l'objectif des acteurs du domaine reste d'aboutir à des réalisations industrielles avant la fin de cette deuxième décennie.

### A plus long terme, une 3<sup>e</sup> génération ?

Au-delà de l'exploitation de la biomasse lignocellulosique, la biomasse marine suscite aujourd'hui un intérêt pour le plus long terme. Suivant leurs caractéristiques et les technologies de conversion considérées, les algues peuvent être transformées en biodiesel, en bioéthanol, en biogaz, en hydrogène, en butanol, etc. La voie présentant aujourd'hui le plus d'intérêt est la production de biodiesel à partir de micro-algues lipidiques autotrophes capables de recycler le  $CO_2$  rejeté par des usines ou des centrales thermoélectriques. Les résultats obtenus en laboratoire laissent espérer des productivités d'huile par hectare de 6 à 60 fois plus importantes que celles obtenues avec les plantes oléagineuses traditionnelles. Les systèmes de production et les investissements qu'ils impliquent restent, pour le moment, à préciser, ainsi que les ressources en eau que ces systèmes nécessitent, et les risques pour l'environnement.

## Conclusion

Après avoir soulevé l'enthousiasme au début des années 2000 et suscité l'indignation ces dernières années, les biocarburants ne méritent sans doute ni l'un ni l'autre de ces excès.

La première génération présente des limites qui sont aujourd'hui relativement bien identifiées et qui freinent sa croissance. Elle n'en a pas moins contribué à amorcer un début de diversification des approvisionnements énergétiques du secteur des transports. Les nouvelles filières, qui visent à utiliser des espèces cultivables sur des terres non agricoles ou à transformer la biomasse lignocellulosique, offrent de nouvelles opportunités et peuvent présenter un intérêt du point de vue environnemental. Le développement non maîtrisé de ces nouvelles filières pourrait néanmoins conduire aux mêmes dérives que celles que l'on reproche aux carburants agricoles de première génération. L'identification des bonnes pratiques et leur promotion demeurent donc incontournables.

D'une manière plus générale, les biocarburants font partie de l'ensemble des solutions qui devront être mises en œuvre pour desserrer les contraintes énergétiques pesant sur les transports, au cours des vingt ou trente prochaines années.

## Note

\* Directeur Économie et Veille, IFP.

## Bibliographie

- [1] Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE) : *L'évaluation des biocarburants*, PNUE, 2009.
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) : *Le développement de la production de biocarburants et ses incidences sur le marché et la sécurité alimentaire*, Rome, avril 2009.
- [3] (A.) PRIEUR (IFP), (F.) BOUVART (IFP), (B.) GABRIELLE (INRA) & (S.) LEHUGER (INRA), *Well to Wheels Analysis of Biofuels Versus Conventional Fossil Fuels. A Proposal for Greenhouse Gases and Energy Savings Accounting in the French Context*, SAE 2008 World Congress, Detroit, avril 2008.
- [4] International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2009*, OCDE/IEA, Paris, 2009.
- [5] (D.) LORNE, *Les unités-pilotes de biocarburants de deuxième génération dans le monde*, IFP/Panorama, Paris, janvier 2008.
- [6] (D.) LORNE : *Quelles ressources en biomasse pour un système énergétique durable ?*, IFP/Panorama, Paris, janvier 2010.
- [7] (D.) LORNE (IFP) & (J.F.) BONNET (Laboratoire Trèfle) : *Eau et biocarburants. Impact sur l'eau du développement des biocarburants en France à l'horizon 2030*, Les cahiers du CLIP, IDDRI, n°19, septembre 2009.

## Comment nourrir neuf milliards de personnes sans détruire l'environnement ?

**Pour sortir des contraintes malthusiennes, la recherche agronomique explore diverses voies. La plus connue consiste à faire porter les solutions par les semences en recourant à des transferts géniques. L'autre voie consiste à privilégier l'utilisation « intensive » des mécanismes écologiques des écosystèmes et d'y ajouter subsidiairement des techniques conventionnelles, à la condition que l'ensemble soit écologiquement cohérent.**

par Michel GRIFFON\*

Durant plus de deux décennies, la question de l'insuffisance de l'alimentation mondiale dans un futur proche ne s'était plus posée. Rappelons qu'elle n'avait jamais quitté l'actualité dans les années d'après-guerre et ce, jusque dans les années 1960, en raison de famines récurrentes en Asie (en particulier en Inde). Cette question avait été résolue grâce à la Révolution verte, un ensemble d'innovations technologiques basé à la fois sur l'amélioration génétique des plantes cultivées, sur un recours intensif à l'irrigation et sur l'utilisation massive d'engrais et de pesticides. Aux moyens technologiques s'ajoutait une politique agricole de soutien aux producteurs très volontariste. La Révolution verte était rien de moins que l'adaptation du modèle agricole « intensif » nord-américain et européen aux pays tropicaux en développement. Mais ce modèle et son adaptation aux zones tropicales sont entrés en crise tant du point de vue environnemental que du point de vue économique dans les années 1990. Peut-on, dès lors, espérer atteindre sans difficulté alimentaire le cap démographique des neuf milliards d'habitants, que notre planète devrait atteindre autour de 2050 ?

### Par nature, l'agriculture a de tout temps dégradé les écosystèmes

La dégradation de l'environnement attribuable à l'agriculture est très ancienne. La chasse, avant même la naissance de l'agriculture, au néolithique, a entraîné l'extinction d'espèces animales remarquables. Une irrigation systématique a souvent entraîné, très tôt dans l'histoire, la salinisation des sols, rendant ceux-ci impropres aux cultures. Dès que les hommes ont dû déboiser pour créer de nouveaux espaces à cultiver a débuté un processus inéluctable de perte de fertilité des sols, de ruissellement des eaux pluviales (au détriment de l'infiltration et donc de l'alimentation des nappes phréatiques) allant, dans beaucoup de cas, jusqu'à la réduction de la pluviosité locale. Une dégradation générale de la fertilité, due au déboisement, avait d'ailleurs déjà été observée dans l'Antiquité, tant par les Grecs que par les Romains.

C'est pour lutter contre ces processus de dégradation que les sociétés ont inventé tout au long de l'histoire des tech-

niques de compensation : le labour (permettant de contrôler l'envahissement des mauvaises herbes qui concurrençaient les plantes cultivées), la traction animale (pour effectuer le labour et récupérer la fertilité procurée par les fumiers), les rotations des cultures dans l'espace (afin d'éviter la pérenniation locale de maladies et de ravageurs), le semis de légumineuses fourragères (pour apporter de l'azote aux cultures), etc. L'heureuse succession des innovations technologiques a toujours donné tort aux prédictions de Malthus, pour qui la croissance démographique (et donc, celle des besoins alimentaires) tendrait naturellement à dépasser la croissance de la capacité des hommes à produire des aliments, faute d'espace et de ressources naturelles. Mais la pensée malthusienne est directement issue de la situation que connaissait l'Europe au XVIII<sup>e</sup> siècle, où les densités de population étaient très élevées et où l'espace était presque intégralement occupé par l'agriculture, ce qui générait des crises alimentaires. Or, c'est précisément une situation malthusienne équivalente qui a prévalu en Asie au milieu du XX<sup>e</sup> siècle et qui a pu être résolue, grâce à la Révolution verte.

Les problèmes actuels de dégradation de l'environnement entraînée par l'agriculture sont des problèmes « post-Révolution verte ». On les retrouve aussi bien dans les agricultures européennes, dites « intensives », que dans toutes les agricultures tropicales utilisant intensivement les techniques conventionnelles. Ces problèmes sont nombreux. L'utilisation de grandes quantités d'engrais occasionne des déperditions d'éléments nutritifs (phosphates, nitrates), qui polluent les rivières, les nappes phréatiques et certaines zones marines. Les engrais azotés sont, par ailleurs, émetteurs de gaz à effet de serre. Le labour étant un utilisateur très important de carburant fossile, il contribue lui aussi à l'effet de serre, auquel contribue également la décomposition rapide de matières organiques (produisant du méthane) que provoque l'enfouissement des chaumes. Le labour favorise, par ailleurs, l'érosion et il contribue aussi à détruire le fonctionnement éco-systémique des sols, ce qui a pour effet d'en limiter la fertilité biologique. Pour protéger les cultures, l'habitude a été prise d'utiliser des herbicides, des insecticides, des fongicides et d'autres biocides présentant des risques pour la santé et l'environnement. La mécanisation a

façonné les paysages en faisant disparaître les haies, et la simplification des systèmes de production a abouti à ne cultiver qu'un petit nombre d'espèces et de variétés, le tout aboutissant à une forte réduction de la biodiversité. A l'échelle de la planète, le déboisement de la forêt tropicale (pour la création de pâturages ou de champs), lui aussi, réduit très fortement la biodiversité et altère le climat régional. L'excès d'utilisation d'eau pour l'irrigation des cultures fait baisser dangereusement le niveau des nappes phréatiques. Au total, dans la phase actuelle d'accroisse-

qu'est le pétrole brut. Ces besoins, dans leur version maximale, supposent un accroissement à la fois des surfaces cultivées et des rendements agricoles. Or, les surfaces cultivées sont limitées par la nécessité de protéger les forêts, et l'accroissement des rendements se heurte à des plafonds insurpassables depuis les années 1990, tout en entraînant des externalités environnementales négatives. Au total, l'accroissement des besoins se heurte donc à une situation à nouveau malthusienne, cette fois-ci, en raison de l'atteinte progressive de limites culturelles.



© Claudius Thiriet/BIOSPHOTO

« Le labour étant un utilisateur très important de carburant fossile, il contribue lui aussi à l'effet de serre, auquel contribue également la décomposition rapide de matières organiques (produisant du méthane) que provoque l'enfouissement des chaumes. Le labour favorise, par ailleurs, l'érosion et il contribue aussi à détruire le fonctionnement éco-systémique des sols, ce qui a pour effet d'en limiter la fertilité biologique ». Tracteur et charrue à gros disques.

ment des besoins alimentaires, les externalités négatives de l'agriculture prennent des proportions très importantes.

### Une nouvelle équation pour l'avenir

La dynamique de ces externalités négatives risque de s'accroître, car les besoins adressés à l'agriculture ne font qu'augmenter. Non seulement la population s'accroît, mais l'émergence de classes moyennes dans les pays émergents connaissant une forte croissance économique, amplifie la demande en viande, laquelle multiplie les besoins en production végétale, et donc en terres nécessaires à la production des aliments pour les animaux de boucherie. A cela s'ajoute la demande, nouvelle, en biocarburants et en molécules diverses produites par l'agriculture visant à les substituer (potentiellement) à la matière première épuisable

Cette situation est d'autant plus malthusienne que d'autres limites se profilent à l'horizon. Les prix de l'énergie sont susceptibles d'augmenter, rendant le labour trop cher. Les engrais azotés, étant produits uniquement à partir du gaz naturel, risquent de connaître à moyen terme le même sort. Les engrais phosphatés sont eux aussi tirés de ressources fossiles et il sera de plus en plus difficile d'avoir accès à des gisements à haute teneur. Par ailleurs, les sociétés actuelles s'opposent de plus en plus à l'utilisation de produits phytosanitaires et ceux-ci sont en permanence rendus inefficaces par les mutations génétiques tant des maladies que des ravageurs, qui deviennent biologiquement résistants. Au total, c'est tout le modèle technique qui a permis d'importants gains de productivité depuis cinq décennies qui est donc ainsi potentiellement remis en cause. Enfin, le changement climatique peut introduire de

nouvelles contraintes, comme la nécessité de lutter contre les effets des sécheresses.

L'équation à résoudre est donc particulièrement difficile. Il faut, en effet, accroître la production par une augmentation des rendements, tout en inventant des bases nouvelles pour la fertilité et la défense des cultures, afin de réduire très significativement les atteintes à l'environnement et de s'adapter au changement climatique. De plus, cela doit être fait, dans beaucoup de cas, dans le cadre d'agricultures pauvres, car la très grande majorité des agriculteurs, dans le monde, sont des agriculteurs pauvres qui vivent dans le cadre d'agricultures familiales fonctionnant principalement en autosubsistance. Il y a donc là, pour la science et la technologie, un défi nouveau – et de taille – à relever.

### Les solutions technologiques

Pour sortir des contraintes malthusiennes, la recherche agronomique explore diverses voies. La plus connue est celle des biotechnologies. Le principe (en simplifiant) consiste à faire porter (totalement ou partiellement) les solutions par les semences en recourant à des transferts géniques, cela en visant, par exemple, à long terme, la fixation symbiotique de l'azote (pour que la plante produise son propre engrais), la meilleure assimilation des minéraux (pour en accroître l'efficacité biologique), la résistance à certaines maladies et à certains ravageurs, l'enracinement profond des plantes cultivées (permettant de recycler des minéraux jusqu'ici peu accessibles) ou encore leur résistance à la sécheresse... L'intégration rapide d'un grand nombre de caractères génétiques de cette sorte ne peut être réalisée que par la seule voie des organismes génétiquement modifiés (OGM). L'obtention de telles performances reste difficile. Par ailleurs, cette voie est très critiquée (notamment en Europe) en raison des incertitudes pesant sur ses effets environnementaux et de ses risques pour la santé humaine (qui concernent, selon les cas, les produits agricoles ainsi obtenus et/ou les processus permettant de les obtenir). Cela ralentit le rythme des innovations, excepté aux Etats-Unis et dans un nombre limité d'autres pays. Mais, en termes de choix techniques visant à accroître les rendements agricoles, il n'y a aucune raison de faire porter tout le poids de l'adaptation aux nouvelles situations économiques et environnementales sur les seules semences. L'utilisation des OGM à l'échelle mondiale devrait donc être davantage raisonnée et raisonnable, en étant réservée à la recherche de solutions où leur avantage comparatif aurait été dûment démontré.

L'autre voie consiste à privilégier l'utilisation « intensive » des mécanismes écologiques des écosystèmes et d'y ajouter subsidiairement des techniques conventionnelles, à la condition que l'ensemble soit écologiquement cohérent.

Plus généralement, il s'agit d'utiliser les mécanismes naturels existants comme source d'inspiration technologique (bio-inspiration). Voici quelques exemples illustrant cette orientation possible :

La fertilité naturelle d'un sol est apportée par un cycle biologique fondamental, qui caractérise l'ensemble de la biosphère : la photosynthèse. Celle-ci utilise le CO<sub>2</sub> de l'at-

mosphère et la lumière solaire pour produire de la biomasse ; cette biomasse, par sa décomposition, produit de l'humus, qui, associé aux argiles, donne au sol sa structure meuble ; la matière organique se minéralise sous forme d'éléments nutritifs, que les plantes sont à même d'assimiler. Dans un écosystème naturel d'un pays tempéré, la totalité de la ressource en lumière est utilisée. Dans un écosystème agricole, le sol est nu durant une partie de l'année et sa capacité photosynthétique n'est donc que très partiellement utilisée, ce qui limite le fonctionnement du cycle de la fertilité. Le recours à des plantes dites « de couverture » occupant le sol pendant la période complémentaire à celle du cycle d'une culture donnée permet donc de tirer profit en continu du processus de la fertilité naturelle. On peut y ajouter (si nécessaire) des apports d'engrais (afin de renforcer la quantité d'éléments nutritifs dans le sol). L'ensemble des techniques qui utilisent ce cycle de la fertilité élimine le labour et ses inconvénients ; on les qualifie le plus souvent de techniques d'*agro-écologie* ou d'*agriculture de conservation*. Un autre processus de régénération de la fertilité naturelle utilise la capacité qu'ont la plupart des légumineuses (comme, par exemple, la luzerne) de fixer l'azote de l'air et de transformer celui-ci (en symbiose avec certaines bactéries) en composés azotés assimilables par les racines. Si ce processus de fixation de l'azote (propre aux légumineuses) pouvait être transféré à des céréales, cela réduirait considérablement les besoins des cultures en engrais azotés d'origine fossile. Autre exemple : le carbone joue un rôle important dans la constitution des molécules qui composent la matière organique des sols, et donc dans leur structure. De plus, sous sa forme simple de charbon de bois pulvérulent, il contribue directement à structurer les sols : il est en effet capable de fixer de nombreuses molécules organiques, de l'eau et certains nutriments. Des apports de carbone peuvent donc accroître la fertilité des sols, comme l'ont démontré diverses expérimentations.

Un autre grand domaine pour l'utilisation de mécanismes naturels en agriculture est celui de la lutte biologique et de la lutte intégrée. Ces techniques consistent à utiliser les chaînes trophiques existant dans la nature : par exemple, parasitisme par des champignons d'un insecte ravageur des cultures, ou utilisation d'un insecte qui soit un prédateur dudit insecte ravageur, ou d'oiseaux se nourrissant d'insectes ravageurs. La technique consiste donc à reconstituer des fragments d'écosystèmes pour obtenir un autocontrôle des envahisseurs biologiques (maladies et ravageurs). Il peut aussi s'agir de diffuser des hormones d'attraction des insectes mâles, puis de les détruire, ce qui réduit la prolifération du ravageur. Autre solution, encore futuriste : on peut rechercher les molécules que les plantes produisent par elles-mêmes afin d'assurer leur autodéfense, puis produire celles-ci en quantité industrielle pour la protection des cultures.

### Des services écologiques

L'ensemble de ces techniques, lorsqu'on les combine entre elles dans un lieu donné, conduit à façonner un éco-



© Denis Bringard/BIOSPOTO

« Il peut aussi s'agir de diffuser des hormones d'attraction des insectes mâles, puis de les détruire, ce qui réduit la prolifération du ravageur ». Plaquette de phéromones dans une vigne pour lutter contre les chenilles.

système dans le sens de la production de « services écologiques » tant à des fins productives qu'à des fins de gestion de la biosphère. L'agriculture peut, en effet, fixer du carbone dans les sols et contribuer ainsi à réduire l'effet de serre. Elle serait d'ailleurs susceptible d'y contribuer davantage si l'on renonçait aux labours et si l'on réduisait les apports d'engrais azotés aux sols cultivés, ou encore les émissions de méthane par les herbivores d'élevage. Elle peut limiter le ruissellement des eaux de pluie en maintenant une couverture végétale permanente et donc favoriser ainsi l'infiltration dans les sols et la recharge des nappes phréatiques, ce qui représenterait un moyen important d'adaptation aux sécheresses. L'infiltration de l'eau dans les sols fait, par ailleurs, jouer à ceux-ci un rôle important d'épuration. Le retour des arbres comme habitat des oiseaux utiles aux cultures et la création de prairies combinant de nombreuses espèces végétales enrichissent la biodiversité, permettant aux insectes pollinisateurs (notamment aux abeilles) de trouver des ressources alimentaires supplémentaires. La plantation d'arbres près des cours d'eau améliore aussi la biodiversité et permet, grâce à leur enracinement profond, de recycler des éléments nutritifs migrant dans les sols qui, s'ils n'étaient pas captés par les racines, pollueraient les eaux (nitrates, phosphates). Par ailleurs, la reconstitution des terroirs sur une base de fonctionnalité écologique peut aussi améliorer la qualité esthétique des paysages. La tech-

nologie « écologiquement intensive » associe donc, en tant que « productions *adventices* » des techniques productives et des techniques de gestion, de précieux services écologiques. En ce sens, l'agriculture écologiquement intensive est une composante de la croissance verte recherchée aujourd'hui.

Au total, le recours à des techniques éco-systémiques (c'est-à-dire à des techniques inspirées par les fonctionnalités naturelles des écosystèmes, les techniques agronomiques conventionnelles venant en complément, mais de manière subsidiaire) permet à la fois d'offrir une alternative technologique à l'agriculture intensive actuelle et de produire des services écologiques devenus indispensables pour compenser la dégradation de la biosphère. Mais une telle évolution nécessite des investissements importants dans la recherche et dans les formations, ainsi que la définition de politiques agricoles et environnementales adaptées permettant, notamment, d'assurer les investissements nécessaires à la recapitalisation écologique dans la « trame verte » et la « trame bleue », et de garantir aux agriculteurs les revenus correspondant aux nouveaux services qu'ils assurent ainsi, pour le bien-être de tous, à l'ensemble de la société.

### Note

\* Directeur général adjoint, Agence Nationale de la Recherche.

## Donner la priorité à une approche économique du développement de l'agriculture africaine

**Plus de 265 millions d'Africains souffrent de la faim. Pourtant, l'Afrique subsaharienne est potentiellement une des principales réserves de terres agricoles de la planète. Mais l'agriculture vivrière africaine souffre de trop de risques pour attirer les investisseurs privés. La priorité doit donc être donnée à une approche « *pro-business* » du développement de cette filière, qui ne se contente pas de supprimer les obstacles aux marchés à travers les libéralisations de l'économie, mais vise à accroître la rentabilité des établissements existants.**

par Bernard BACHELIER\*

L'agriculture est une question incontournable, qui s'impose d'emblée lorsque l'on s'intéresse à l'Afrique subsaharienne. En effet, l'économie du continent africain reste fortement déterminée par les questions agricoles, qu'il s'agisse des exportations de produits tropicaux ou des importations de produits alimentaires de base.

Près de la moitié de la population de l'Afrique est rurale. Mais sa production agricole reste peu intensive. La moyenne des rendements céréaliers s'élève à 13 quintaux par hectare en Afrique subsaharienne, soit un tiers de la moyenne mondiale (qui est de 32 quintaux par hectare). Cette agriculture est faiblement capitalisée et peu mécanisée. Elle utilise peu d'engrais, essentiellement pour des cultures de rente (comme, par exemple, le coton). La disponibilité alimentaire moyenne par habitant est la plus faible de toutes les moyennes continentales, avec 2 400 kilocalories/jour/habitant (pour une moyenne mondiale approchant les 3 000 kilocalories et des maximums qui dépassent les 4 000 kilocalories, en Amérique du Nord). Plus de 265 millions d'Africains souffrent de la faim, ce qui représente plus du quart de la population.

Pourtant, l'Afrique subsaharienne est potentiellement une des principales réserves de terres agricoles de la planète. Seuls 20 % des surfaces cultivables sont exploités, soit 200 millions d'hectares, pour un potentiel estimé à 1 milliard d'hectares. Ces terres attirent, d'ailleurs, la convoitise des investisseurs étrangers.

Les ressources en eau sont importantes, même si leur répartition est inégale, et c'est l'insuffisance des financements qui ne permet pas de les mettre en valeur.

La crise alimentaire qui a frappé la planète en 2008 a touché la plupart des pays d'Afrique subsaharienne. Elle a rappelé au monde le déséquilibre structurel auquel ont conduit deux décennies de désengagement à l'égard de l'agriculture. Le potentiel de l'agriculture africaine n'a pu s'exprimer faute d'accès aux investissements et aux financements, et faute de politiques agricoles favorables.

Nous formulons l'hypothèse que la crise alimentaire, suivie des crises financière et économique de 2009, est susceptible de provoquer une rupture dans la conception des politiques agricoles dans le monde. Cette rupture a quelque chance d'entraîner des conséquences positives pour l'agriculture africaine, en raison de l'existence d'une société civile africaine (en particulier, d'organisations professionnelles agricoles).

### Assurer la sécurité alimentaire des villes par les importations : un choix dangereux

Ce qu'on a appelé la crise alimentaire de 2008 a eu pour origine une envolée des prix agricoles sur les marchés internationaux, en quelques mois (du milieu de l'année 2007 à la mi-2008). Elle a provoqué des émeutes de la faim dans la plupart des capitales africaines, au printemps 2008. Ces révoltes résultaient d'une augmentation du prix des denrées de base importées (essentiellement du riz). En effet, le prix du riz sur le marché international avait été multiplié par trois entre octobre 2007 et mai 2008, passant de 300 dollars (en octobre 2007) à 900 dollars la tonne (en mai 2008).

Plusieurs raisons expliquent ces augmentations. D'abord, une réduction sensible des stocks mondiaux de céréales, depuis le milieu des années 2000. En effet, la production de céréales a plafonné à la suite de mauvaises récoltes (telles celles dues aux sécheresses en Australie), de la diversification de la production dans certains pays émergents (comme la Chine) et d'un désinvestissement généralisé dans l'agriculture. L'effet sur les prix a été amplifié par un contexte général de hausse des matières premières et par la spéculation sur les produits agricoles.

L'Afrique n'était pas à l'origine de cette envolée, mais elle en a subi les conséquences, car elle avait pris l'habitude de recourir aux importations alimentaires pour combler les déficits de sa production. Ce comportement a été en grande partie encouragé par les plans d'ajustement structurel



© Pierre Bessard/REA

« Dans la Communauté Économique et de Développement des États de l'Afrique de l'Ouest (CEDEAO), les productions de rente, exportées en grande partie, ont connu elles aussi une forte croissance. Les deux produits phares ont été le coton, passé de 470 000 tonnes de coton graine à 2,6 millions de tonnes et le cacao, de 880 000 tonnes à 2,7 millions de tonnes de fèves ayant été récoltées ». Stockage de graines à Bobo Dioulasso (Burkina Faso).

mis en œuvre sous l'égide du Fonds Monétaire International. Le raisonnement consiste à alléger au maximum les dépenses publiques de soutien aux produits de base, tout en maintenant les prix alimentaires à un niveau le plus bas possible. Si ce mécanisme a fonctionné sans grande difficulté depuis une vingtaine d'années, c'est en raison du fait que les importateurs trouvaient des produits agricoles bon marché sur les marchés extérieurs. Lorsque la crise est survenue, le négoce des céréales, trop externalisé, a été dans l'incapacité de se tourner rapidement vers les productions locales.

Dans les faits, ces faibles prix se sont révélés constituer des plafonds pour les prix des productions locales. D'autant que l'agriculture africaine n'a pas bénéficié des investissements qui lui auraient permis d'améliorer sa compétitivité. L'économie africaine est une économie ouverte aux marchés extérieurs ; la fiscalité des importations agricoles est faible (de l'ordre de 10 % en termes réels). Il en résulte que toute politique protectionniste aurait pour effet d'augmenter les prix alimentaires à la consommation, sauf si l'agriculture africaine est en mesure de couvrir la demande.

### **Un potentiel agricole inexploité, faute d'investissements**

Or, l'agriculture africaine possède le potentiel productif lui permettant d'assurer les besoins de la population. C'est

ce qu'a montré en 2007 (déjà) une étude commandée par la Fondation pour l'Agriculture et la Ruralité dans le Monde (FARM). Cette étude, qui porte sur l'Afrique de l'Ouest (Communauté Économique et de Développement des États de l'Afrique de l'Ouest – CEDEAO), a été réalisée par un groupe d'experts africains et français.

Durant les vingt-cinq dernières années, alors que la population a doublé, la production végétale régionale a plus que triplé : la production vivrière est ainsi passée de 59 millions de tonnes en 1980 à 212 millions de tonnes en 2005. Les croissances les plus spectaculaires sont celles de la production de maïs (multipliée par 5,3), des tubercules (+ 43 %) ainsi que des légumineuses et des céréales traditionnelles. Ces résultats ont été atteints, dans une proportion de 70 %, grâce à l'extension des surfaces cultivées et, pour les 30 % restants, grâce à l'augmentation des rendements. Cette répartition est l'inverse de ce qui est constaté dans le reste du monde : elle montre que l'agriculture africaine ne s'est pas intensifiée.

Les productions de rente, en grande partie exportées, ont connu elles aussi une forte croissance. Les deux produits phares ont été le coton, passé de 470 000 tonnes de coton graine récoltées à 2,6 millions de tonnes et le cacao, de 880 000 tonnes à 2,7 millions de tonnes de fèves récoltées.

L'Afrique de l'Ouest pourrait satisfaire ses besoins agricoles tout en préservant ses ressources naturelles dès lors

qu'elle s'engagerait dans l'intensification de la production sur les surfaces déjà cultivées. Elle dispose de 236 millions d'hectares. Seuls 24 % de ce potentiel sont cultivés, soit 55 millions d'hectares. Il existe un réservoir de terres disponibles à la lisière des forêts des pays humides côtiers tels que le Nigeria, le Ghana et la Côte d'Ivoire. Les pays soudanais (comme le Mali), où seulement 10 % des terres sont cultivés, possèdent des terres non encore exploitées représentant 40 % de la totalité des terres arables.

L'accroissement des rendements est conditionné par la maîtrise de l'eau. Les ressources hydriques de l'Afrique sont significatives. Ainsi, au Mali, pays parcouru par les deux grands fleuves Niger et Sénégal, les ressources en eau renouvelables sont d'environ 7 500 m<sup>3</sup> par habitant et par an, soit plus du double de la disponibilité en France (3 300 m<sup>3</sup> par habitant et par an). Mais, faute d'infrastructures, les populations ont peu accès à ces ressources. Ce sont ainsi moins de 2 % des eaux de surface qui sont mobilisées annuellement à des fins agricoles en Afrique de l'Ouest. De plus, certaines dépressions favorables à la création de retenues d'eau locales offrent un potentiel important en matière de terres irrigables (de 11 à 16 millions d'hectares).

Le développement de l'irrigation est indispensable à la satisfaction des besoins en riz alors que la région dépend des importations de cette céréale à hauteur de 55 %. La demande en riz, estimée en 2025 (pour 455 millions d'habitants), s'élèverait à 22 millions de tonnes de riz et nécessiterait un peu moins de 7 millions d'hectares (avec un rendement de 5 tonnes/hectare). La superficie actuellement consacrée au riz est de 5 millions d'hectares, avec un rendement de 1,67 tonne de paddy à l'hectare. Mais le rendement moyen (de 4 tonnes/hectare, dans la zone de l'Office du Niger) montre que ces objectifs ne sont pas hors de portée ; leur atteinte requiert l'aménagement de 2 à 3 millions d'hectares.

### **L'agriculture vivrière africaine souffre de ne pas être considérée comme une source de croissance économique**

Pourquoi l'agriculture africaine n'a-t-elle pas tiré parti de ce potentiel en 2008 ? Pour trois raisons : 1) les prix ne se sont pas transmis aux producteurs ; 2) les paysans n'avaient de toute façon plus de stocks et, 3) ils n'avaient pas non plus accès au crédit nécessaire pour pouvoir augmenter leur production l'année suivante.

En effet, les études ont montré que la hausse des prix mondiaux n'a que très peu bénéficié aux agriculteurs africains. Dans la plupart des cas, la transmission des fluctuations de prix entre les marchés mondiaux et les marchés locaux est faible et transitoire. De fait, les deux facteurs majeurs influençant cette transmission sont la place prise par le riz dans les régimes alimentaires de la population locale et la proportion de riz importé dans la consommation totale de riz. Un cas extrême est celui du Sénégal, où 80 % du riz consommé sont importés et où le riz représente la moitié de la consommation de céréales. L'augmentation des prix du riz importé s'est répercutée sur le prix du riz séné-

galais. Mais cette augmentation locale n'a été que de 30 à 40 %, tandis que les prix du riz sur le marché international triplèrent. Au Mali, qui dispose d'une production intérieure importante, l'effet du prix mondial est resté modeste pour les agriculteurs.

Le plus ou moins bon fonctionnement des marchés est un autre facteur important à prendre en compte. A mesure que l'on s'éloigne des moissons, les prix montent. Les négociants achètent les productions locales après la récolte, si bien que ce sont eux qui profitent des augmentations des prix. Rares sont les agriculteurs ou les organisations agricoles qui conservent une partie de leur production. Ils sont d'autant plus rares que le stock représente un capital immobilisé et que son stockage a un coût. Les exploitations agricoles ne disposent pas de la capacité financière leur permettant de couvrir ces dépenses. Il en va de même de l'accès au crédit permettant aux exploitations d'acquiescer les moyens de produire (achat d'engrais, de semences améliorées, de pesticides, de matériel pour l'irrigation). Quand bien même seraient-ils informés, les paysans africains n'ont pas accès au financement. La plupart d'entre eux se trouvaient dans l'incapacité d'accroître leur production en 2009, contrairement aux agriculteurs des pays riches.

En fait, l'agriculture vivrière africaine se trouve dans un angle mort ; elle est laissée pour compte par l'économie et elle se réduit à des programmes sociaux de lutte contre la pauvreté. D'un point de vue économique, les productions vivrières africaines souffrent de trop de risques (climatiques et commerciaux) pour attirer les investisseurs privés. D'un autre côté, les programmes sociaux se limitent à la sécurité alimentaire des familles souffrant d'une insuffisance de production alimentaire. Enfin, comme le rappelle l'édition 2008 du rapport de la Banque Mondiale sur le développement dans le monde, les crédits publics à l'agriculture sont tombés au plus bas, tant en matière d'aide publique que dans les budgets nationaux.

Il faut inverser cette approche et considérer l'agriculture comme un moteur économique. A cette fin, il faut que les produits alimentaires (tels que le riz, le maïs, le sorgho, pour les céréales, le manioc pour les tubercules ou certains produits d'élevage) deviennent des denrées commerciales pour les marchés urbains locaux.

Il ne s'agit pas de condamner les cultures de rente. Elles ne sont pas à l'origine des faiblesses des filières vivrières. Au contraire, elles permettent aux producteurs d'accéder au marché, d'acquiescer des facteurs de production et d'investir. Les producteurs de coton sont aussi, bien souvent, les meilleurs producteurs de maïs. Ce qui est en cause, c'est la dépendance excessive des revenus des agriculteurs vis-à-vis de produits exportés en totalité. L'agriculture ne peut se développer que grâce à un équilibre entre les exportations et les marchés intérieurs.

La question clé est celle de l'accès au crédit. Moins de 5 % des agriculteurs africains sont bancarisés. Les banques de crédit agricole se sont progressivement retirées de ce secteur. Le microcrédit devait théoriquement offrir ses atouts de proximité et d'adaptation. En réalité, s'adressant à des activités à rentabilité rapide, il est encore peu adapté



© Francis Perri/REA

« Un cas extrême est celui du Sénégal, où 80 % du riz consommé sont importés et où le riz représente la moitié de la consommation de céréales ». Publicité pour une marque de riz à Dakar (Sénégal).

aux productions alimentaires. Les taux d'intérêt du micro-crédit (de 12 % à 30 % par an) ne peuvent être supportés par des productions céréalières dont la rentabilité ne dépasse pas les 4 %. Il est impossible d'anticiper les prix de vente des productions agricoles, d'autant plus que ces prix varient énormément. Car, si les fluctuations internationales se transmettent mal aux prix locaux, il existe une forte volatilité locale due aux aléas climatiques, d'une part, et au mauvais fonctionnement des marchés, d'autre part.

S'ajoute, à cela, le fait que les projets de développement ont privilégié les actions en direction des agriculteurs pris individuellement. Rien (ou presque) n'a été fait pour favoriser les fonctions économiques des organisations agricoles. Il en résulte que les projets n'ont pas permis l'accumulation de capital et la constitution de fonds propres collectifs. Ils n'ont pas permis de former les responsables agricoles aux questions économiques. Des services communs, de type coopératif, qui ont structuré les filières agricoles ailleurs dans le monde, n'ont pas vu le jour en Afrique. Dans le contexte africain, ces services ne peuvent être assurés aux agriculteurs par le seul marché. La bonification des crédits à l'agriculture, la formation des agriculteurs et les mesures incitatives à l'investissement constituent des outils indispensables des politiques agricoles qu'il est souhaitable de mettre en place en Afrique.

### La question foncière

Un autre frein à l'intensification de l'agriculture en Afrique est l'absence d'un droit foncier agricole. Depuis la crise alimentaire de 2008, l'appropriation de terres agricoles dans les pays du Sud mobilise les médias et l'opinion publique. La question des terres en Afrique subsaharienne ne se résume pas aux « accaparements » : l'Afrique vit depuis les indépendances une transition progressive du mode de propriété, passant des divers droits coutumiers à la propriété foncière. C'est d'ailleurs là un des thèmes majeurs des lois d'orientation agricole. Dans la plupart des pays africains, deux types de droit coexistent encore : un droit consacrant la propriété communautaire ou coutumière et un droit fondé sur des actes de propriété privée délivrés par l'administration (qui étaient déjà largement connus et utilisés dans les villes).

Les gouvernements, tout comme les leaders du secteur agricole, sont convaincus de la nécessité d'instaurer un droit foncier pour aboutir à une réelle modernisation de l'agriculture. En effet, l'augmentation des rendements et la garantie des emprunts présupposent une sécurité foncière. Mais les intérêts en présence sont nombreux, et parfois contradictoires. Les autorités traditionnelles tirent une grande partie de leur pouvoir de l'attribution

des terres, ce qui contraint les gouvernements à la prudence.

En Afrique, c'est dans ce contexte foncier complexe que sont annoncés à grand bruit des investissements fonciers massifs. Le phénomène généralement appelé « accaparement des terres » est une allocation de surfaces agricoles (par un bail de longue durée ou par une vente) à des investisseurs étrangers. Les investissements fonciers existent depuis longtemps, mais ils semblent s'être multipliés dans la dernière période. Ainsi, depuis 2004, 2,5 millions d'hectares auraient fait l'objet d'investissements en Afrique subsaharienne (Mali, Ghana, Soudan, Éthiopie) et à Madagascar.

Pour les gouvernements hôtes, la location ou la vente de terres est un moyen de répondre à des besoins d'investissements dans le secteur agricole et le milieu rural. La FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) estime que, pour réduire la faim dans le monde de moitié d'ici à 2015, ce sont non moins de 30 milliards de dollars supplémentaires qui seront nécessaires, chaque année, à l'agriculture des pays en développement. Or, l'aide publique au développement n'étant pas en mesure de répondre à ces besoins, les gouvernements de ces pays sont poussés à rechercher des investisseurs privés, la seule chose qu'ils aient à leur offrir étant leur accès à des terres.

Mais toutes les études soulignent l'écart important entre les annonces et les réalisations effectives. Les États n'acceptent pas systématiquement l'intégralité des exigences des investisseurs. Les processus administratifs sont longs et les contrats sont parfois invalidés, comme cela a été le cas d'un projet d'achats de terres par des Coréens, à Madagascar. En fait, ces projets se heurtent à la résistance des organisations agricoles africaines, souvent relayées par des ONG occidentales (la réalité étant le fait que les terres agricoles convoitées par les investisseurs en raison de leur qualité relèvent d'un droit coutumier, même si elles ne sont pas mises en valeur chaque année).

Les investissements étrangers dans les terres arables africaines pourraient avoir des retombées positives s'ils s'intégraient dans des projets de développement régionaux conçus et pilotés en partenariat avec les populations locales, le risque étant cependant que l'Afrique perde aussi cette source d'investissement, faute d'avoir élaboré le cadre législatif et les règles contractuelles nécessaires.

### **Une approche *pro-business*, face à un contexte nouveau**

Le moment est venu de promouvoir une vision cohérente qui vise délibérément à développer les aspects économiques. C'est ce que nous appelons l'approche *pro-business*, (d'après l'expression d'un économiste d'Harvard, Dany Rodrik). Celui-ci opère un distinguo entre une orientation *pro-marché* et une orientation *pro-business* (ou *pro-entre-*

*prise*). « La première vise à supprimer les obstacles aux marchés à travers les libéralisations de l'économie. La seconde vise à accroître la rentabilité des établissements industriels et commerciaux existants. Elle tend à favoriser les entreprises et les producteurs », explique-t-il. En d'autres termes, les politiques nationales peuvent mettre en place, si nécessaire, des dispositifs de protection permettant à l'agriculture locale d'améliorer sa compétitivité.

Mais les deux priorités sont : 1) l'investissement en faveur de l'agriculture et 2) la construction de politiques publiques favorables à l'économie des filières agricoles. Cette approche doit être mise en œuvre au moyen d'un partenariat étroit entre le secteur public, les organisations professionnelles agricoles et les entreprises privées, qui constituent l'environnement économique de l'agriculture. Des financements publics sont nécessaires. Les mesures de protection ne sont que des conditions suffisantes de la réussite. En effet, sans les investissements indispensables, le protectionnisme ne peut que provoquer une augmentation des prix inacceptable socialement. L'amélioration de la compétitivité de l'agriculture doit accompagner (sinon précéder) les politiques de protection.

Les actions de soutien doivent être considérées comme des investissements en faveur de la formation, de l'accès au crédit et de la professionnalisation des filières. Ces investissements doivent être alloués aux acteurs professionnels selon des contractualisations finalisées. Il faut favoriser une gestion de type privé des crédits publics. L'État doit veiller au cadre législatif et réglementaire et mettre en place les politiques incitatives d'accompagnement.

Les crises alimentaire, financière et économique créent un nouveau contexte pour la conception des politiques publiques en matière d'agriculture et la régulation des marchés agricoles. La communauté internationale s'est engagée à mobiliser des moyens importants en faveur de la sécurité alimentaire. Le risque consisterait à utiliser ces moyens selon les modalités antérieures, qui ont conduit à l'impasse que nous connaissons. Or, une nouvelle génération de responsables agricoles africains s'est affirmée en réaction au désengagement des États. Ces leaders possèdent une vision lucide de la situation et une expérience concrète des réalités. Ils sont prêts à assumer des responsabilités de chefs d'entreprises. Or jusqu'à présent, ils ne trouvent en face d'eux ni les politiques, ni les moyens qui leur permettraient de s'engager dans cette approche du développement. C'est dans cette nouvelle conception des politiques agricoles qu'il faut s'engager.

### **Note**

\* Directeur de la Fondation pour l'Agriculture et la Ruralité dans le Monde – FARM (reconnue d'utilité publique) (<http://www.fondation-farm.org/>).

# La gestion stratégique des ressources minérales par les Etats et les compagnies minières : vers un développement des oligopoles ?

**Assurer l'approvisionnement de 9 milliards d'êtres humains en ressources minérales en 2050 représente un défi stratégique majeur. L'industrie minérale mondiale doit cependant faire face à un nombre toujours plus important d'enjeux stratégiques et de risques, notamment des coûts d'investissement et d'exploitation croissants.**

par Patrice CHRISTMANN et Bruno MARTEL-JANTIN\*

Les ressources minérales sont indispensables au bien-être humain, au même titre que l'air et l'eau. La compétition mondiale pour l'accès aux ressources naturelles ne fera que s'intensifier. Selon l'Organisation des Nations Unies, la population mondiale atteindra 9 milliards d'individus en 2050, la plupart des nouvelles naissances se produisant dans des pays dont les économies restent à être développées. La tendance mondiale à un mode de vie de plus en plus urbain, fortement consommateur de ressources minérales, va également contribuer à stimuler la demande internationale en ressources minérales.

Les stratégies des Etats et celle des entreprises sont de la plus haute importance pour relever les défis colossaux, qui s'annoncent dans ce domaine, à l'avenir. Mais les Etats et les entreprises ont des objectifs très différents : les Etats visent la maximisation des recettes fiscales et le développement économique et social, alors que les entreprises cherchent à maximiser le rendement de leurs investissements et à générer de la valeur au profit de leurs actionnaires.

Ces stratégies différentes peuvent néanmoins ne pas être antinomiques, car la génération de valeur sur la durée nécessite, à la fois :

- ✓ un cadre propice aux investissements, d'un montant de plus en plus élevé, nécessaires à la découverte, puis à la mise en valeur de nouveaux gisements,
- ✓ la réduction des risques autres que techniques liés à l'investissement minier,
- ✓ l'acceptabilité sociale du projet minier,
- ✓ la réduction au maximum des impacts environnementaux (sur la biodiversité, la qualité de l'air, la fertilité des sols, la quantité et la qualité des eaux de surface et souterraines...),
- ✓ la formation des populations aux questions relatives à l'exploitation des ressources minérales.

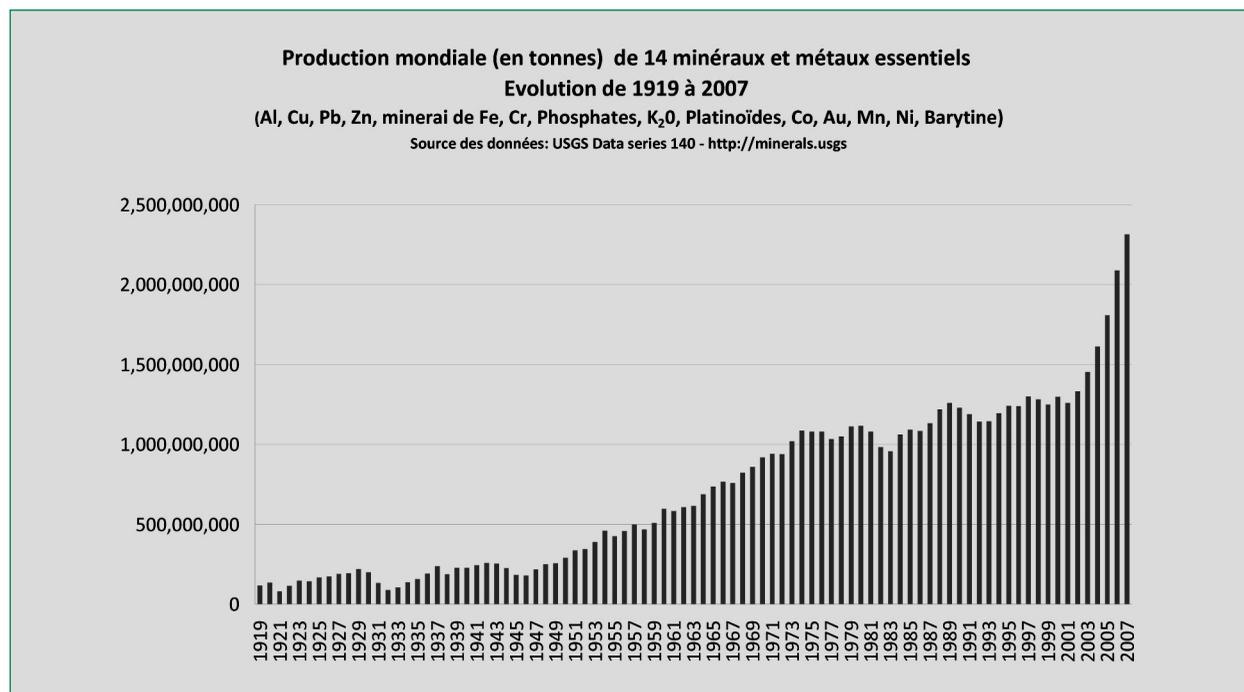
Au cours de la période qui a suivi la révolution iranienne de 1979 et le second choc pétrolier (jusqu'en 2002), année du début du « super-cycle » lié au développement économique rapide de la Chine, la majorité des acteurs

politiques et économiques occidentaux n'ont prêté que peu d'attention à l'industrie minérale et à la question de la sécurité des approvisionnements en métaux pourtant toutes deux essentielles. Depuis 2002, la montée en puissance des pays émergents, l'apparition de nouvelles technologies considérées comme économiquement porteuses, mais consommatrices de métaux rares et une compétition accrue pour l'accès aux ressources ont récemment amené de nombreux Etats (la Chine, la Corée du Sud, le Japon, les Etats-Unis, mais aussi l'Allemagne, la France, la Finlande, la Suède...) et plusieurs institutions internationales (Banque Mondiale, Commission européenne, Union africaine, Banque africaine de Développement) à s'engager dans le développement de stratégies formelles de développement de l'industrie minérale, voire de sécurisation d'approvisionnements considérés comme stratégiques dans une perspective de développement durable.

Cet article proposera quelques éclairages sur cette problématique, forcément limités en raison de l'étendue du sujet et de sa complexité.

## **Un défi stratégique majeur à relever : assurer l'approvisionnement de 9 milliards d'êtres humains en ressources minérales en 2050**

La figure 1 montre (à partir de données publiées par l'USGS) l'évolution entre 1919 et 2007 de la production minérale de 14 minéraux et métaux essentiels à l'économie mondiale et au bien-être social, alors que, durant cette période, la population mondiale s'est accrue d'un facteur x3,6, la consommation de ces minéraux et métaux a été, quant à elle, multipliée de près de vingt fois ! Cette figure montre aussi l'accroissement spectaculaire de la production depuis 2002 : elle s'explique par le développement rapide de pays émergents, tels que le Brésil, l'Inde et – surtout – la Chine. L'extrapolation de cette tendance à l'horizon 2050, avec une population mondiale qui devrait atteindre 9 milliards d'habitants, indique un énorme défi, que le monde



**Figure 1 :** Evolution entre 1919 et 2007 de la production annuelle minière mondiale de 14 minéraux essentiels à l'économie mondiale.

entier devra affronter, et dont on est loin d'être certain qu'il pourra être relevé.

Ce défi est lourd de graves conflits potentiels, qui risquent d'éclater autour du contrôle de l'accès aux gisements, de tentatives de captation des approvisionnements par tel ou tel Etat, voire par des cartels dominants (ou par des groupes mafieux). L'environnement mondial risque de pâtir sérieusement d'une telle course aux ressources minières si des moyens de régulation internationaux ne sont pas mis en place. Ces moyens de régulation restent à inventer et à faire accepter par l'ensemble des Etats.

### Quelques exemples de stratégies adoptées par certains Etats

Dans le secteur minier, les stratégies des Etats diffèrent fortement entre elles, selon qu'il s'agit de pays développés à régime politique démocratique, de pays émergents dirigistes ou de pays encore sous-développés. Elles diffèrent également selon les périodes et la conjoncture des cours des métaux. Les croyances en divers modèles économiques ont beaucoup fluctué, évoluant entre le « tout Etat » des pays à économie planifiée et le « tout libéral » de Milton Friedman et de son Ecole de Chicago.

Quatre grandes catégories de stratégies de développement de l'industrie minière peuvent être distinguées empiriquement :

✓ les stratégies des pays développés et démocratiques peu peuplés et à fort potentiel géologique : ce sont les stratégies que l'on peut observer dans des pays tels que l'Australie, le Canada, la Finlande ou la Suède. Les pouvoirs publics tendent à y soutenir le développement de l'industrie minière, notamment grâce à d'importants

investissements dans l'infrastructure publique de recueil de données géologiques, géophysiques et géochimiques, dans le fonctionnement des institutions essentielles au développement de l'industrie minière (un service géologique, une direction des mines et une direction de l'environnement étant le minimum requis). L'exemple suédois est une excellente illustration de cette catégorie de stratégies, basée sur :

- la stabilité du cadre applicable aux investissements et donc, sa prévisibilité,
- le dialogue entre l'opérateur industriel et des pouvoirs publics traditionnellement favorables à l'industrie minière,
- l'existence d'instituts de recherche et d'universités ayant maintenu des compétences élevées dans le secteur minier et travaillant en réseau avec l'industrie minière,
- l'acceptation sociale du projet minier.

Ce cadre stratégique rend possible et profitable l'exploitation du porphyre cuprifère d'Aitik, en Suède, qui est exploité par la société Boliden, bien qu'il s'agisse, en l'occurrence, de l'un des minerais de cuivre parmi les plus pauvres exploités actuellement (teneurs moyennes en métaux de ce minerai dans les réserves identifiées : 0,28 % de cuivre ; 0,2 g/t d'or, 2g/t d'argent et moins de 50 g/t de molybdène, soit moins que ce que renferment les grands porphyres cuprifères du Chili) [1] [2] et ce, malgré des conditions climatiques sévères – ce gisement est situé au nord du Cercle Polaire –, des coûts salariaux élevés et des normes environnementales très strictes.

✓ les stratégies minières des pays développés fortement peuplés, dont la France, l'Allemagne, l'Espagne, la Grèce ou le Portugal sont de bons exemples au sein de l'Union européenne.

Le développement minier y est rendu compliqué par la densité d'une population souvent peu intéressée à voir se développer des activités minières et l'existence de divers types d'occupation des sols peu favorables au développement de ces activités. Ces pays ont un cadre juridique et fiscal stable et prévisible, de bonnes institutions sectorielles, mais la période 1979-2002 y a été marquée par un large désintérêt pour les thématiques liées aux ressources minérales. Pendant cette période, leurs Etats ont souvent fortement réduit les effectifs de leurs services géologiques travaillant dans le domaine des ressources minérales, et réduit leurs efforts de recherche et leurs activités de veille économique. En Europe, leur attention a été largement limitée aux impacts environnementaux de l'industrie minérale. Ce n'est que très récemment (en Allemagne, en 2007, et en France, en 2009) que les ressources minérales y sont redevenues une priorité des agendas politiques et que des travaux ont été lancés, mobilisant conjointement les acteurs politiques, économiques et scientifiques en vue de la définition de stratégies nationales de sécurisation des approvisionnements en ressources minérales.

Parmi les pays relevant de cette catégorie, l'Allemagne est un cas intéressant, le gouvernement fédéral allemand ayant publié en mars 2007 [3] les éléments essentiels de sa stratégie en matière de matières premières non énergétiques, ainsi qu'un rapport sur l'avancement de sa mise en œuvre, en juillet 2008 [4]. Cette stratégie est basée sur les points ci-après :

- la création d'un Comité interministériel des matières premières de base,
- la lutte contre les entraves au libre commerce des matières premières minérales,
- le renforcement des actions de coopération avec les pays en voie de développement dans le domaine des matières premières,
- l'amélioration de la transparence des paiements versés par les entreprises aux Etats, notamment grâce à un soutien à l'Initiative sur la Transparence des Industries Extractives (ITIE),
- le développement de l'intégration verticale des industries utilisatrices de matières premières minérales,

l'une des pistes éventuelles étant la relance d'un programme de soutien public à l'exploration minière mis au point dans les années 70-80,

- le renforcement des capacités d' « intelligence » minière du service géologique allemand,
- l'amélioration de l'efficacité de l'usage des matières premières minérales et le développement de produits de substitution (recherche et développement),
- le développement du recyclage,
- le développement de l'utilisation des ressources naturelles nationales,
- la stimulation de la recherche et le développement de réseaux de chercheurs,
- la politique étrangère et européenne, notamment en apportant un appui actif à l'Initiative Matières Premières de la Commission européenne.

La Commission européenne est en train de développer sa propre stratégie de sécurisation des approvisionnements européens en matières premières, dans le cadre de l'Initiative Matières Premières, essentiellement centrée sur les ressources minérales [5].

✓ **la stratégie minière des pays en voie de transition économique rapide.** Ce groupe compte le Brésil, la Chine, l'Inde et la Russie. Ensemble, ils représentent environ 2,8 milliards d'humains, soit un peu plus de 40 % de la population mondiale. L'évolution de ces pays influe d'une manière considérable sur les marchés des matières premières minérales, la Chine jouant un rôle de tout premier plan (elle doit, en effet, à la fois assurer son propre développement interne et assumer son rôle d'usine du monde, lié aux délocalisations vers elle de nombreuses industries manufacturières des pays développés).

Le tableau 1 présente la part de la Chine dans la consommation globale de plusieurs métaux usuels essentiels au développement économique de n'importe quel pays, étant indispensables dans la construction, le développement des infrastructures, ainsi que pour la production et la distribution de l'énergie.

Cela a fait de la Chine le premier consommateur mondial de nombreuses matières premières minérales, ce qui

Métal	Evolution de la consommation apparente chinoise 2001-2007	Part de la consommation apparente chinoise 2007 par rapport à la consommation mondiale
Aluminium primaire	157 %	32 %
Cuivre primaire	113 %	32 %
Fer	252 %	54 %
Magnésium	327 %	43 %
Nickel	283 %	21 %
Plomb	263 %	70 %
<b>Part de la population chinoise dans la population mondiale : environ 21 %</b>		

**Tableau 1 :** Evolution de la consommation apparente de la Chine en métaux usuels, au cours de la période 2001-2007, et part de la Chine dans la consommation mondiale 2007.

Sources des données : Annuaire Statistique des Minerais, Mines et Métaux et USGS.

bouleverse les marchés des matières premières et crée une nouvelle donne stratégique pour les prochaines décennies.

La politique des matières premières minérales de la Chine est exposée dans un document officiel de décembre 2003, disponible en anglais [6]. Ce document officiel de doctrine et l'abondante littérature existant sur le rôle de la Chine dans le domaine des matières premières montrent que la politique des matières premières minérales de ce pays est basée sur :

- un monopole d'Etat, la plupart des grandes entreprises minières et métallurgiques étant des entreprises d'Etat,
- la volonté de créer de nouveaux groupes miniers d'Etat,
- un appui administratif et diplomatique intensif aux entreprises investissant dans l'exploitation des res-

Sud, Gabon, Niger, République Démocratique du Congo, Zambie...), y compris dans des pays faisant l'objet de sanctions occidentales (Zimbabwe),

- l'aide au développement des pays économiquement pauvres, mais riches en minerais, entièrement liée à l'intervention d'entreprises chinoises. Par contre, la Chine n'impose aucune des conditionnalités imposées par les bailleurs occidentaux en matière de bonne gouvernance, de respect des droits de l'homme et de critères environnementaux et sociaux,
- l'existence de réserves de change estimées à 2,4 trillions de \$ (1),
- la constitution de stocks stratégiques considérables de minerais et métaux (aluminium, cuivre, fer, manganè-



© Keith Dannemiller/REA

« La politique des matières premières minérales de la Chine est basée sur [...] l'aide au développement des pays économiquement pauvres, mais riches en minerais, entièrement liée à l'intervention d'entreprises chinoises. Par contre, la Chine n'impose aucune des conditionnalités imposées par les bailleurs occidentaux en matière de bonne gouvernance, de respect des droits de l'homme et de critères environnementaux et sociaux ». La ville de Morococha (Pérou) où Chinalco exploite des mines d'aluminium et de cuivre (projet Toromocho, le plus important investissement de la Chine en Amérique latine).

sources de pays tiers, notamment de pays en développement,

- le financement à des conditions favorables des investissements des entreprises d'Etat intervenant dans la recherche et le développement minier à l'étranger,
- des tentatives de prise de contrôle de grandes sociétés occidentales productrices de matières premières minérales,
- des investissements importants, subventionnés et peu transparents, dans le développement de gisements situés dans des pays en développement (Afrique du

se...) répartis sur le territoire chinois, générés par le Bureau de l'Administration des Réserves Nationales et des Matériaux (BARNM),

- la mise en place de restrictions à l'investissement étranger, afin d'empêcher des investisseurs étrangers de prendre le contrôle d'actifs industriels considérés comme stratégiques par le gouvernement chinois,
- la mise en place d'une politique de restriction des exportations de matières premières minérales, par exemple, au moyen de l'application de quotas d'exportation et de taxes à l'exportation,

- des coûts salariaux extrêmement bas rendus possibles par la quasi-inexistence d'une politique sociale chinoise et la faiblesse, savamment entretenue, de la monnaie chinoise,
- des normes environnementales extrêmement basses, avec, cependant, des perspectives d'évolution.

Cette politique est en partie sous-tendue par la crainte qu'ont les autorités chinoises de voir s'épuiser les ressources nationales en minéraux indispensables à une croissance, qu'elles souhaitent maintenir à un rythme supérieur à 8 % par an. Une question fondamentale est de savoir si cette stratégie de marche forcée est soutenable, et jusqu'à quand elle le restera.

✓ **la stratégie minière des pays encore sous-développés.**

L'exemple le plus pertinent est l'Afrique subsaharienne, où, en 2008, 32 pays faisaient encore partie des pays à faibles revenus (selon le classement de la Banque Mondiale). L'Afrique subsaharienne représente un enjeu majeur pour l'avenir de l'approvisionnement de l'économie mondiale en matières premières minérales. Sur la base des données publiées par l'USGS, elle concentre plus de 40 % des réserves mondiales connues de bauxite, cobalt, diamants, manganèse, or, platine et rhodium, et elle est riche de nombreuses autres substances minérales. En 2009, les ministres des Mines des Etats africains membres de l'Union africaine ont approuvé un document de stratégie de développement de leur patrimoine minéral intitulé « *Africa Mining Vision 2050* » : ce document de cinquante-deux pages présente une analyse lucide et les éléments détaillés d'une stratégie de développement de l'industrie minière, au bénéfice du développement durable de l'Afrique [7]. Cette stratégie est fondée sur 6 piliers :

- 1) le niveau et la qualité des données sur le potentiel en ressources minérales ;
- 2) le développement des capacités de négociation des Etats en matière d'accords spécifiques au secteur minier ;
- 3) le développement des capacités de développement et de gouvernance des ressources minérales de ces pays ;
- 4) l'amélioration des capacités de gestion de leur rente minière ;
- 5) la prise en compte des contraintes liées aux infrastructures africaines existantes ;
- enfin, 6) la prise en compte des mines de petite taille, ainsi que des mines exploitées artisanalement.

Sa mise en œuvre se heurte cependant à la pauvreté des pays africains. En 2007, sur les 46 Etats d'Afrique subsaharienne membres du groupe des Etats ACP, 32 appartenaient au groupe des pays à faible revenus (moins de 2 \$ de PIB par jour et *per capita*). Difficile, dans ces conditions, d'imaginer comment ces Etats pourraient être en mesure d'investir dans la mise en œuvre de la stratégie de développement de leur potentiel minier... Une aide, soutenue dans la durée, des bailleurs de fonds est indispensable, l'Union européenne (en tant que premier donateur mondial) ayant un rôle particulier à jouer, cela d'autant plus que l'un des défis qu'elle a à rele-

ver pour son propre développement est d'assurer la sécurité des approvisionnements en ressources minérales dont son économie dépend. Or, depuis la fin (en 2000) de la facilité spéciale de financement du secteur minier Sysmin (d'un montant de 575 M€ pour la période 1995-2000), la Commission européenne s'est largement désengagée du secteur minier (encore que le Sysmin était non pas un instrument de développement du secteur minier bénéficiant à l'ensemble des pays à fort potentiel géologique, mais un instrument de compensation des pertes de revenus d'exportations de pays miniers affectés par des aléas imprévisibles).

Il paraît essentiel que le plan d'actions s'inscrivant dans l'Initiative Matières Premières que la Commission européenne présentera aux Etats membres en novembre 2010 comporte un instrument de financement spécifique d'appui à la mise en œuvre de la stratégie de développement du secteur des ressources minérales, l'*Africa Mining Vision 2050*, promulguée par l'Union africaine.

Hors coût de développement des infrastructures, une facilité de financement d'un milliard d'euros sur 10 ans apparaît nécessaire pour acquérir des connaissances nouvelles sur le sous-sol africain, sécuriser les connaissances actuelles, développer les institutions sectorielles nécessaires (services géologiques, directions des mines, directions de l'environnement...), former les cadres nécessaires et assurer la dissémination et la promotion des informations. A défaut d'un fonds spécifique européen d'appui au développement du secteur des ressources minérales des pays ACP, la mise en œuvre de l'*Africa Mining Vision 2050* risque de se heurter au problème de son financement.

### **Enjeux et stratégies pour l'industrie minière : vers le développement des oligopoles ?**

La poursuite des tendances décrites par la figure 1 est-elle possible ? Sera-t-il possible de multiplier, à nouveau, par vingt la production minière mondiale ? Cela n'est pas certain, car l'industrie minière mondiale doit faire face à un nombre toujours plus important d'enjeux stratégiques et de risques croissants :

✓ **des coûts d'investissement croissants** : La base de données *MineSearch* [8], l'une des bases de données commerciales les plus complètes sur l'industrie minière mondiale, contient des données concernant 154 projets miniers, pour lesquels l'investissement en capital total atteint 317 milliards de dollars. Parmi ceux-ci, on en compte 136 qui ne sont pas encore en production, mais qui se situent à des niveaux de développement différents (étude de faisabilité en cours, développement des réserves, pré-production...), pour un capital investi total de 317 milliards de dollars ;

✓ **des coûts d'exploitation croissants** : dans une récente présentation, un économiste de *RioTinto* [9] a montré qu'entre le début de 2003 et la fin de 2007, l'indice des coûts d'exploitation de l'or a augmenté de 100 %, et celui du cuivre de 180 %. Ce coût devrait continuer à augmenter, car les mines du futur seront de plus en plus souterraines (ce sera le cas, en particulier, dans les pays

développés), exploitant soit les racines profondes de grands gisements connus en surface, soit de nouveaux gisements profonds et cachés. *RioTinto* anticipe qu'en 2025, 40 % de la production minière mondiale de cuivre sera souterraine, contre 26 % en 2008 [9]. Le coût moyen d'exploitation du minerai de cuivre en carrières est de 169 \$/tonne de cuivre-métal, contre 225 \$/tonne dans le cas des mines souterraines ;

- ✓ **la baisse de la teneur en métal des minerais exploités :** les gisements les plus riches, affleurants, des pays développés ont déjà été exploités, ce qui implique la nécessité d'exploiter des minerais plus pauvres ou plus complexes à traiter. Certains gisements ont des parties superficielles enrichies par des phénomènes d'oxydation du minerai primaire et de reconcentration sous la forme de minerais secondaires (zones oxydées des porphyres cuprifères, zones à calamine de certains gisements de zinc, gossans aurifères des gisements épithermaux d'or). Pour le cuivre, la teneur moyenne en cuivre des réserves exploitées était de 0,97 % Cu en 1996, contre 0,70 % Cu en 2008 [10] ;
- ✓ **la nécessité de rechercher sans cesse de nouvelles réserves, à un rythme sans cesse accéléré,** afin de compenser l'épuisement progressif des réserves déjà connues et de pouvoir faire face à la croissance de la demande ;
- ✓ **une compétition accrue entre entrepreneurs miniers appliquant des règles du jeu différentes :** depuis plus de dix ans, l'industrie minière occidentale (notamment les entreprises cotées en bourse) est engagée dans d'importantes actions de progrès en matière de performance environnementale et sociale. Parmi ces actions figurent le développement des pratiques de responsabilité sociale des entreprises, le rapportage de la performance durable des entreprises, les initiatives visant à améliorer la transparence des flux financiers (dont, notamment, l'Initiative pour la Transparence des Industries Extractives – ITIE). Ce développement contraste fortement avec celui des sociétés minières des pays émergents (notamment chinoises), dont la transparence et l'éthique environnementale et sociale paraissent nettement plus faibles.

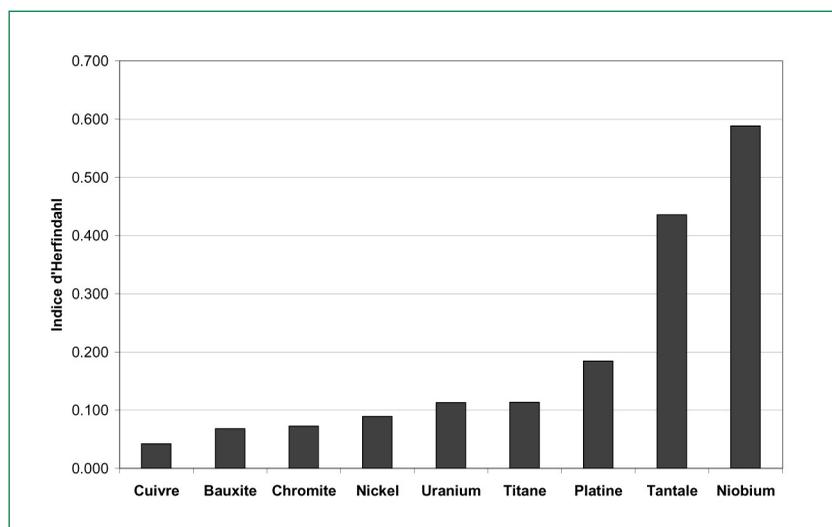
### Face aux nombreux risques inhérents à l'investissement minier, va-t-on vers un développement d'oligopoles miniers ?

L'investissement minier est une catégorie d'investissement particulièrement risqué, car de nombreux aléas peuvent affecter, voire ruiner, l'investissement dans le secteur minier :

- ✓ les risques d'insuccès de l'exploration, la plupart des projets d'exploration ne conduisant pas à la découverte d'un gisement ;
- ✓ les risques géologiques liés à la complexité des gisements, à la variabilité de la qualité des minerais ;
- ✓ les risques géopolitiques, l'industrie minière étant amenée à investir dans des pays politiquement instables,
- ✓ les risques liés à la volatilité des marchés : des évolutions technologiques et/ou réglementaires peuvent fortement réduire la demande de certaines matières premières minérales ou, au contraire, la stimuler,
- ✓ les risques liés à l'immobilisation des investissements et à l'intensité capitalistique du secteur. Une mauvaise anticipation de l'évolution des marchés, un retournement des marchés (tel que l'effondrement des cours des matières premières minérales lors de l'éclatement de la bulle financière de 2008) peuvent ruiner les milliards de dollars investis dans un projet minier, car il est impossible de démonter et de remonter ailleurs les équipements et les infrastructures installés pour un projet minier.

Cette exposition au risque financier est documentée, notamment, par le cas de la mine de nickel de Ravensthorpe, en Australie, dans le développement de laquelle BHP Billiton a investi 3,7 milliards de dollars et qui, ayant cessé l'exploitation moins d'un an après son démarrage, a finalement revendu son investissement pour seulement 340 millions de dollars à First Quantum [11] [12].

L'envolée des cours des matières premières qu'a connue la période 2002-2008 a permis à certaines entreprises minières d'engranger de substantiels bénéfices, masquant la faible rentabilité des investissements miniers sur le long terme. Le rapport final du projet *Mining, Minerals and*



**Figure 2 :** Degré de concentration (Indice d'Herfindahl), en 2008, des producteurs miniers occidentaux pour une sélection de matières premières minérales – Dérivé des données de Raw Materials Data.

*Sustainable Development*, qui est la plus grande étude à avoir été réalisée et porte sur les liens entre l'investissement minier et le développement durable, souligne la volatilité des rendements liés à l'industrie minière, qui, « lors des 25 dernières années, n'a pas produit un rendement de long terme qui corresponde aux coûts du capital » [13]. Ces rendements sont encore plus médiocres si l'on y intègre la rémunération des risques spécifiques à l'industrie minière brièvement évoqués ci-dessus.

Les stratégies de gestion des risques développées par les entreprises minières, extrêmement diverses, reflètent la grande hétérogénéité de l'industrie minière. Pour certains métaux, par exemple le cuivre, l'intégration verticale entre l'exploitation minière et la métallurgie est largement répandue (Codelco, Freeport Mc Moran, Rio Tinto...)

alors que celle-ci n'existe pratiquement pas dans l'industrie du fer, où les entreprises minières sont indépendantes de celles de la sidérurgie.

Parmi ces stratégies, le phénomène des fusions-acquisitions de sociétés minières se développe, car il permet à l'acquéreur d'espérer :

- ✓ réaliser des économies d'échelle (par exemple, par la mise en commun d'infrastructures minières et d'infrastructures de transport : ce fut l'un des moteurs de la tentative (qui s'est conclue par un échec) d'acquisition de RioTinto par BHP Billiton, au premier semestre 2008) ;
- ✓ l'acquisition de réserves à des conditions assurées, et donc en ne prenant pas le risque de l'exploration ;
- ✓ le renforcement significatif du pouvoir de négociation du mineur par rapport au métallurgiste, et donc de ses perspectives de rentabilité, lorsque ces deux éléments de la chaîne de production de l'industrie minière sont dissociés. L'accroissement significatif de la part du marché du



© THE NEW YORK TIMES/REA

« L'analyse montre une absence de concentration notable des producteurs de cuivre, de bauxite, de chromite, de nickel, d'uranium et de titane. Même pour la production du minerai de fer, dominée par ces géants de l'industrie minière que sont Vale Inco, BHP Billiton et Rio Tinto, l'indice de concentration IHH n'est pas très élevé ». Mine de fer de la firme Rio Tinto à Tom Price (Australie).

minerai de fer fut certainement un autre moteur de la tentative d'acquisition de RioTinto par BHP Billiton.

Le nombre et le volume financier des opérations de fusions et d'acquisitions s'est envolé au cours de la période d'inflation des cours des matières premières minérales, de 2002 à 2008, (avec 762 opérations, pour une valeur totale de 69,9 milliards de dollars en 2005, contre 1 732 opérations, pour une valeur de 158,9 milliards de dollars, en 2007) : on est donc, à de rares exceptions près, fort loin d'une situation oligopolistique dans l'industrie minière.

L'indice d'Herfindahl-Hirschmann (IHH) [14], largement utilisé notamment par les autorités de la concurrence, aux Etats-Unis, et par la Commission européenne, permet de mesurer le degré de concentration d'une industrie. Si l'IHH est inférieur à 0,1, on

considère généralement que le secteur est peu concentré, et donc qu'il présente peu de risques de problèmes.

L'IHH de chaque filière (cuivre, fer, plomb...) de l'industrie minière est difficile à calculer, car les bases de données commerciales ne permettent d'identifier, pour les principales substances métalliques, qu'une partie des entreprises productrices de chaque substance, à savoir essentiellement les sociétés cotées en bourse ou publiant un rapport annuel détaillant la production de l'entreprise. La figure 2 représente l'IHH des matières premières minérales pour lesquelles il est possible d'identifier quelle part de la production mondiale est contrôlée par un opérateur déterminé, le total de la production ainsi identifiée dépassant 70 % de la production mondiale identifiée dans la base de données commerciale sur l'industrie minière mondiale publiée par *Raw Materials Data* [15].

Elle montre une absence de concentration notable des producteurs de cuivre, de bauxite, de chromite, de nickel,

d'uranium et de titane. Même pour la production du minerai de fer, dominée par ces géants de l'industrie minière que sont Vale Inco, BHP Billiton et Rio Tinto, l'IHH n'est que de 0,05, mais il n'est pas représenté à la figure 2, car les productions identifiées par *Raw Materials Data* ne représentent que 54 % de la production mondiale.

Par contre, le degré de concentration est très élevé en ce qui concerne d'autres substances, telles que le platine, le tantale, le niobium ou les terres rares (celles-ci n'étant pas couvertes par *Raw Materials Data*, du fait que c'est la Chine qui en assure 98 % de la production mondiale). Cette concentration s'explique cependant davantage par des facteurs géologiques (forte concentration géographique des grands gisements économiquement exploitables, avec des réserves importantes, rendant peu attractives l'exploration et la mise en valeur de nouveaux gisements) et les avantages concurrentiels dont jouissent les opérateurs établis, surtout dans les cas où leurs investissements miniers et métallurgiques initiaux ont déjà été amortis.

Le risque de voir se développer de véritables oligopoles miniers paraît éloigné, cela d'autant plus que les autorités de régulation des marchés financiers et de la concurrence des pays occidentaux surveillent de très près les projets de fusions et acquisitions, n'hésitant pas à les contrer lorsque celles-ci risqueraient d'aboutir à la création d'oligopoles. Mais quel sera, demain, le rôle des fonds souverains ? Doit-on craindre le retour, non pas d'oligopoles, mais de nationalismes des matières premières du type de ceux qui ont sous-tendu quelques-uns des plus graves conflits, y compris sur le continent européen ?

Les axes stratégiques d'une industrie globale et multi-forme à prendre en compte par toutes les parties prenantes de l'industrie minière (au premier rang desquelles figurent les opérateurs industriels, les banques et les Etats) sont le renforcement de la transparence de l'industrie minière mondiale, l'engagement des opérateurs et des Etats en appui à des standards sociaux équitables et environnementaux minimisant les impacts de l'industrie minière sur l'air, les sols, les eaux et la biodiversité, la bonne insertion de l'industrie minière dans son cadre social local et régional, la mise au point d'indicateurs documentés du développement durable qui soient adaptés à l'industrie minière, ainsi que celle de statistiques fiables de production et de commerce international, la transparence des transactions et, enfin, la traçabilité des filières d'approvisionnement des pays occidentaux.

Outre le fait que la stabilité internationale de ce XXI<sup>e</sup> siècle commençant dépend de la mobilisation concertée de toutes ces parties prenantes, c'est par le respect des conditions précédentes qu'une industrie minière globale pourra continuer à se projeter dans une perspective de développement durable.

Utopie ?

## Notes

\* Service Ressources Minérales, BRGM.

adresses courriel : p.christmann@brgm.fr et b.martel-jantin@brgm.fr

(1) Source : Banque Centrale de Chine, citée par le Wall Street Journal du 15 janvier 2010 – [http://online.wsj.com/article/SB10001424052748703657604575004501953577566.html?mod=WSJ\\_latestheadlines](http://online.wsj.com/article/SB10001424052748703657604575004501953577566.html?mod=WSJ_latestheadlines)

## Bibliographie

[1] CHADWICK (J.), *Operation focus – Aitik 36 – Infomine Inc*, Vancouver (Canada), 2008 – disponible en ligne : <http://www.infomine.com/publications/docs/InternationalMining/Chadwick2008g.pdf>

[2] Boliden, *Capital markets days: market update* – Boliden, Stockholm, Suède, 2009. Disponible en ligne : [http://www.boliden.com/www/en/bolidenen.nsf/WebReferensdokEng/CB2A46FC52BF3D68C12576240040740A/\\$file/4\\_CMD\\_Aitik\\_Market\\_LE\\_web.pdf](http://www.boliden.com/www/en/bolidenen.nsf/WebReferensdokEng/CB2A46FC52BF3D68C12576240040740A/$file/4_CMD_Aitik_Market_LE_web.pdf)

[3] *Die Bundesregierung – Elemente einer Rohstoffstrategie der Bundesregierung*, Berlin (Allemagne), 2007.

[4] *Die Bundesregierung – Zwischenbilanz der Rohstoffaktivitäten der Bundesregierung* (Schwerpunkt nichtenergetische Rohstoffe), Berlin (Allemagne), 2008.

[5] Commission européenne, *Communication sur la promotion du développement durable dans l'industrie extractive non énergétique dans l'UE*, 2000 – disponible en ligne : <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2000:0265:FIN:FR:PDF>

[6] *Information Office of the State Council of the People's Republic of China – China's Policy on Mineral Resources* – Pékin (Chine), 2003 – Disponible en ligne : <http://www.china.org.cn/eUnited-white/20031223/>

[7] *Africa Union and United Nations Economic Commission for Africa – Africa Mining Vision 2050* – Union africaine – Addis Abeba (Ethiopie), 2009

[8] *Metals Economics Group* – Base de données « Mine Search » (accès payant) – Halifax (Canada), 2010.

[9] BREWSTER (N.), *Short run risks and long run metals prices* – RioTinto, Londres (Angleterre), 2009 – Disponible en ligne : [www.riointinto.com](http://www.riointinto.com)

[10] Rio Tinto – *Kennecot Utah Copper Finance Community Update* – RioTinto, Londres (Angleterre), 2009 – Disponible en ligne : [www.riointinto.com](http://www.riointinto.com)

[11] WANG (T.), *BHP's \$3.7 Billion Investment Not Worth A Nickel* – Forbes, 2009, édition en ligne : [http://www.forbes.com/2009/01/21/bhp-losses-mining-markets-comm-cx\\_twdd\\_0121markets02.html](http://www.forbes.com/2009/01/21/bhp-losses-mining-markets-comm-cx_twdd_0121markets02.html)

[12] MATHEW (M.), *We'll fix Ravensthorpe, says First Quantum* – Sydney Morning Herald – Sidney (Australie), 2009 – Disponible en ligne : <http://www.smh.com.au/business/well-fix-ravensthorpe-says-first-quantum-20091209-kk5p.html>

[13] *International Institute for Environment and Development (IIED) – 2002 – Breaking New Ground: Mining, Minerals and Sustainable Development* – Rapport final du projet « Mining, Minerals and Sustainable Development », IIED (Londres) – disponible en ligne : <http://www.iied.org/pubs/pdfs/9084IIED.pdf>

[14] Wikipedia – 2010 – Disponible en ligne : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Indice\\_de\\_Herfindahl-Hirschmann](http://fr.wikipedia.org/wiki/Indice_de_Herfindahl-Hirschmann)

[15] *Raw Materials Data* – Base de données « Raw Materials Data » (accès payant) – Stockholm (Suède), 2009.

# L'initiative européenne sur les matières premières (1)

**Il y a un peu plus d'un an, la Commission européenne a adopté un document stratégique, « Initiative "matières premières" – répondre à nos besoins fondamentaux pour assurer la croissance et créer des emplois en Europe » – COM(2008) 699, qui propose une approche cohérente et globale pour répondre aux défis qui se présentent dans le domaine des matières premières industrielles.**

par Abraão de CARVALHO\*

## Introduction

Le XX<sup>e</sup> siècle s'est achevé avec la prise de conscience de l'importance de l'accès durable à certaines ressources naturelles, telles que le pétrole ou l'eau. Le début du XXI<sup>e</sup> siècle semble débiter, quant à lui, avec une prise en compte similaire concernant, cette fois-ci, les matières premières industrielles.

Il s'agit notamment des minéraux métalliques, sans lesquels la plupart des biens dont dépend le fonctionnement de nos économies, ne pourraient plus être produits. Qu'il s'agisse de moyens de transports, comme l'avion, le train ou la voiture, ou de n'importe quelle machine ou appareil de télécommunication, tous nécessitent différents types de minéraux métalliques.

C'est aussi le cas de la plupart des technologies dites vertes, telles celles des panneaux solaires ou des nouveaux types de batteries hybrides, dont le fonctionnement nécessite des minéraux métalliques présentant certaines caractéristiques très particulières.

Le lithium (pour les batteries), le platine (comme catalyseur pour les automobiles), les terres rares (dans les aimants permanents des moteurs électriques), les alliages titane-rhénium (dans les avions) ou le gallium et l'indium (dans certains types de cellules photovoltaïques) en sont quelques exemples. Pour un grand nombre de ces ressources, nous sommes confrontés à une forte pression au niveau de la demande, due à la croissance non seulement des nouveaux marchés liés aux nouvelles technologies, mais aussi des économies émergentes. Il s'agit d'un enjeu structurel, qui perdurera après la crise économique et financière que nous venons de subir.

Il y a un peu plus d'un an, la Commission européenne a adopté un document stratégique, intitulé « *Initiative Matières Premières* » – répondre à nos besoins fondamentaux pour assurer la croissance et créer des emplois en Europe » – COM(2008) 699 (2), qui propose une approche cohérente et globale pour répondre aux défis auxquels nous sommes confrontés dans le domaine des matières premières industrielles.

Cette initiative a reçu un très large soutien de tous les Etats membres, qui se sont prononcés à plusieurs reprises sur cette question durant les présidences tchèque et suédoise. La présidence espagnole lui apporte, elle aussi, son plein appui.

Cet article a pour but de présenter cette Initiative, de manière succincte.

## Une réponse intégrée et globale

Le document pose les quatre questions ci-après, avant d'y apporter des réponses :

Que peut-on faire, à l'intérieur de l'Union européenne ?

Comment devenir plus efficaces sur le plan de la consommation et comment recycler davantage ?

Que peut-on faire au niveau international ?

Pouvons-nous identifier les différents matériaux en termes de « risque d'approvisionnement » ?

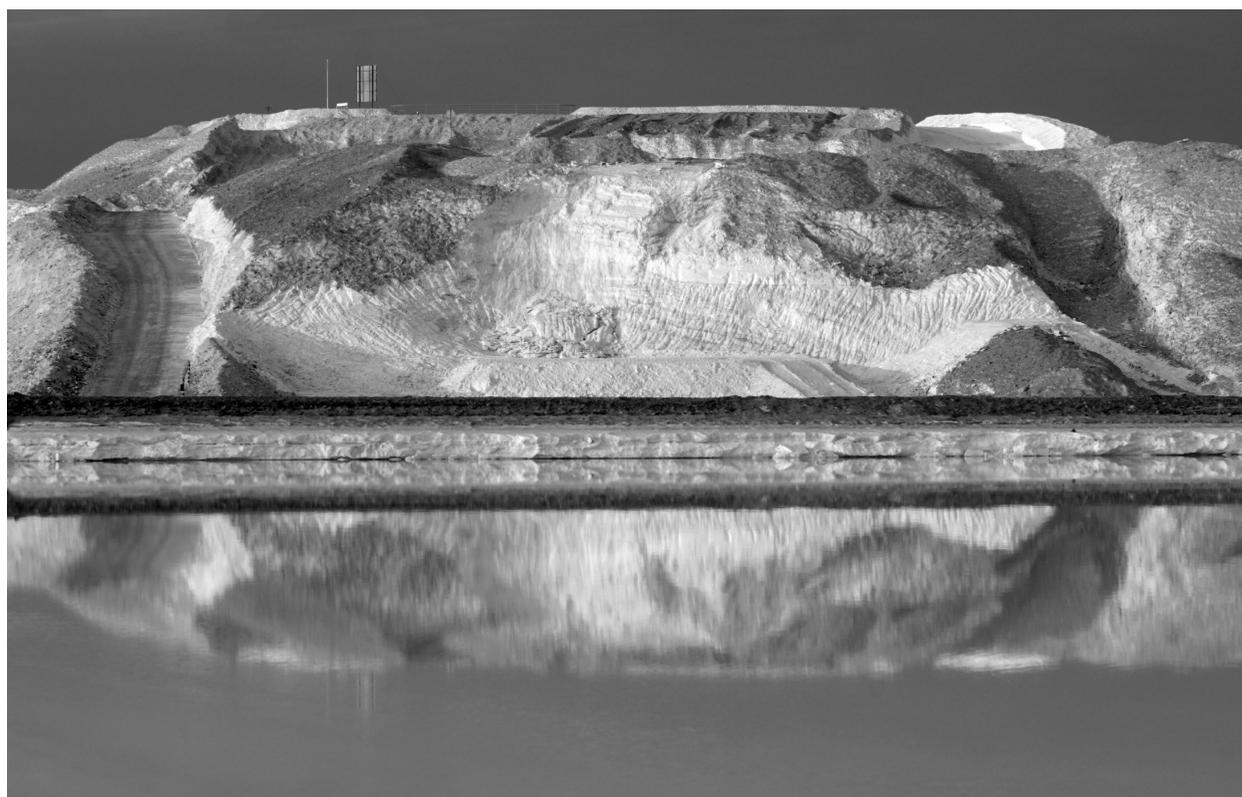
## Que peut-on faire, à l'intérieur de l'Union européenne ?

Le fait même de poser cette question dévoile un ordre du jour qui semblait jusqu'à présent un peu « poussiéreux » ou, tout au moins, peu connu du grand public.

Disposons-nous encore de gisements importants en Europe ? Avons-nous les moyens techniques et humains pour les exploiter ? Y a-t-il des contraintes légales ou non ? Pouvons-nous trouver de nouveaux compromis, en matière de développement durable, entre la nécessité d'exploiter ces ressources et le respect de l'environnement ?

Essayons d'apporter une réponse à quelques-unes de ces questions.

Il existe encore beaucoup de *gisements en Europe*, soit de minéraux de construction, soit de minéraux industriels et métalliques (3). Leur répartition entre les Etats membres est variable, mais, pour faire simple, on peut dire que dans tous les Etats membres, y compris dans les nouveaux, il existe d'importants gisements de la plupart des matériaux de construction et/ou des minéraux industriels. En revanche, en ce qui concerne les minerais métalliques, la situation est plus nuancée.



© Diego Guidice/ARCHIVOLATINA-REA

« Qu'il s'agisse de n'importe quelle machine ou appareil de télécommunication, tous nécessitent différents types de minéraux métalliques. Le lithium (pour les batteries), le platine (comme catalyseur pour les automobiles), les terres rares (dans les aimants permanents des moteurs électriques), les alliages titane-rhénium (dans les avions) ou le gallium et l'indium (dans certains types de cellules photovoltaïques) en sont quelques exemples ». Le salar d'Atacama (Chili), d'où sont extraits divers minéraux tels que le lithium, le potassium et le sodium.

Par ailleurs, un espace stratégique important, parfois oublié, doit être pris en compte : le *milieu maritime*. L'Europe (en particulier, la France) a un littoral très important ; cela lui donne un accès à d'importantes ressources sous-marines, pour autant que la technologie nécessaire à l'exploitation soit disponible, et, évidemment, que le respect de l'environnement soit assuré. Les services de la Commission, dans le respect du principe de subsidiarité, suivent avec beaucoup d'intérêt les initiatives prises par la France dans ce domaine, notamment en matière de recherche et développement.

D'une façon générale, que ce soit sur terre ou en mer, la réconciliation des activités industrielles avec la protection de l'environnement est possible.

La Commission a ainsi rappelé que le cadre législatif Natura 2000 n'établit aucune interdiction absolue en ce qui concerne les opérations d'extraction. La Commission s'est engagée à élaborer des lignes directrices en la matière, à l'intention des entreprises et des autorités concernées des États membres.

Ces orientations devront préciser à quelles conditions les activités extractives, se déroulant à l'intérieur ou à proximité de zones classées Natura 2000, sont conciliables avec les contraintes qu'impose la nécessaire protection de l'environnement.

Par ailleurs, l'expérience montre qu'il est nécessaire de rationaliser l'administration des activités extractives, notamment en accélérant le traitement des demandes d'autorisation des activités de prospection et d'extraction. Les

États membres sont de plus en plus sensibles à ces enjeux et il y a sûrement là un domaine propice à un échange de bonnes pratiques entre les autorités compétentes des États membres. La Commission travaille intensément en concertation avec les experts des États membres et des résultats concrets devraient être rendus publics avant la fin de l'année.

### **Le capital humain : les compétences et la recherche et développement**

Pour revaloriser l'activité d'exploitation minière, un bon cadre légal est nécessaire, mais pas suffisant. Dans une société de la connaissance, le capital humain reste le facteur primordial de succès.

L'un des enjeux majeurs consiste à revaloriser *les compétences*, qui existent en Europe et qui risquent de disparaître, faute d'activité économique sous-jacente ou du fait d'une image négative mais obsolète ne correspondant plus à une activité devenue moderne et technologiquement innovante.

Des partenariats plus efficaces entre les universités, les instituts d'études géologiques et les entreprises doivent être encouragés, afin de relever ces défis. Dans le cadre de la mise en œuvre de l'« Initiative Matières Premières », la Commission entend encourager des initiatives, telles que la Journée européenne des Minéraux, et favoriser l'acquisition de nouvelles compétences de haut niveau en matière de géologie, d'observation de la terre et d'environnement,

notamment à travers des programmes d'études conjointes, de masters et de doctorats, mis en place dans le cadre du Programme Erasmus Mundus (2009-2013) sur les minéraux et l'environnement.

Le 7<sup>e</sup> Programme Cadre de Recherche et Développement mérite d'être signalé en tant qu'instrument communautaire important pour promouvoir des *projets de recherche* mettant l'accent sur l'extraction et le traitement des matières premières.

Une plateforme technologique européenne des ressources minérales durables regroupant des experts des centres de recherche et de l'industrie a été créée. Elle constitue un forum qui identifie les enjeux stratégiques relatifs aux technologies de prospection innovatrices, ainsi qu'aux nouvelles technologies extractives permettant de maximiser les avantages économiques et environnementaux.

La recherche peut également jouer un rôle majeur dans l'élaboration de matériaux de substitution qui permettront d'assouplir les processus de production et de réduire le risque de dépendance vis-à-vis des importations. Ce type de recherche de nouveaux matériaux peut également faire l'objet d'une coopération avec des pays tiers intéressés par ce domaine.

Dans le domaine des connaissances relatives aux gisements minéraux existant dans l'Union européenne, *les services géologiques* jouent, bien évidemment, un rôle majeur.

La Commission européenne recommande donc d'en améliorer la mise en réseau au sein de l'Union afin de faciliter l'échange d'informations entre eux et d'améliorer l'interopérabilité de leurs données, ainsi que leur diffusion, en accordant une attention toute particulière aux besoins des PME.

### **Le recyclage et l'efficacité dans l'utilisation des ressources naturelles**

La discussion sur le degré de rareté des ressources naturelles (en l'occurrence, celle des minéraux) reste assez ouverte : cette rareté dépend à la fois de la nature même des différents minéraux concernés et des conditions économiques de leur extraction.

L'on assiste à une indéniable prise de conscience du besoin d'éviter le gaspillage. Dans cette perspective, une première réponse apportée aux défis posés par l'accès aux matières primaires est la *promotion du recyclage*.

Un recours accru à des matières premières secondaires contribue à la sécurité d'approvisionnement et à l'efficacité énergétique. Cela est particulièrement vrai en ce qui concerne les métaux, qui peuvent être recyclés à l'infini, sans perte de propriétés physiques, et dont la réutilisation dans le cycle de production permet une consommation d'électricité limitée, en tout cas considérablement moindre que celle de la production à partir de ressources naturelles.

Cependant, de nombreux produits en fin de vie ne sont pas actuellement intégrés dans des circuits de recyclage réguliers, ce qui se traduit par une perte irrémédiable de matières premières secondaires de valeur.

Certains éléments donnent à penser qu'un pourcentage important des *déchets* qui quittent l'UE ne sont pas

conformes aux règles en vigueur, même si la situation varie considérablement d'un État membre à l'autre. Sont essentiellement concernées les exportations de véhicules et d'équipements électroniques en fin de vie, qui quittent l'Europe en tant que produits réutilisables en l'état, mais qui sont, en réalité, démontés à l'étranger.

Cette situation est d'autant plus regrettable que le transport physique de produits en fin de vie exportés et de matières premières importées (résultant d'opérations de recyclage se déroulant à l'extérieur de l'UE, dans des conditions réglementaires moins strictes) aboutit à d'importantes « fuites » environnementales.

Le recyclage de matières premières secondaires pourrait être facilité par une mise en œuvre complète et une application efficace de la législation en vigueur sur le recyclage, ainsi que par les nouvelles dispositions de la directive-cadre sur les déchets, qui précisent les conditions dans lesquelles des déchets cessent d'être qualifiés comme tels, acquérant ainsi un statut de matières premières secondaires.

La politique thématique de l'UE en matière d'utilisation durable des ressources naturelles a consisté en une stratégie de long terme visant à dissocier l'exploitation des ressources de la croissance économique. Dans un plan d'action récent en faveur d'une consommation et d'une production durables et d'une politique industrielle durable, la Commission vise à stimuler davantage l'*efficacité* dans l'utilisation des ressources et les processus de production éco-innovateurs, à réduire la dépendance vis-à-vis des matières premières et à encourager une utilisation et un recyclage optimaux des ressources.

L'OCDE recommande, quant à elle, à ses membres, de favoriser la productivité des ressources en renforçant leurs capacités d'analyse des flux de matières ; la Commission européenne participe activement aux travaux conduits dans cette enceinte. Au sein de l'Union européenne, des « Centres de Données » sur les ressources naturelles, les produits et les déchets assureront la coordination des contributions des États membres.

### **La dimension internationale des risques en matière d'approvisionnement**

Indépendamment de tous les efforts qu'elle déploie afin d'améliorer l'accès aux ressources existantes à l'intérieur de l'Union, il est évident que l'Europe restera toujours dépendante des approvisionnements en provenance de pays tiers, pour beaucoup de matières primaires. Dans un certain nombre de cas, cette *dépendance* est très élevée, voire totale, en ce qui concerne, par exemple, plusieurs minéraux métalliques absolument indispensables, tels l'antimoine, les terres rares et le cobalt.

La production mondiale de certaines de ces matières premières est parfois concentrée dans un petit nombre de pays fournisseurs, dont certains peuvent être, de surcroît, victimes d'instabilité politique.

La Commission mène actuellement un exercice approfondi en vue d'établir une première liste de minéraux, dont l'approvisionnement peut être considéré comme critique.

Des risques d'approvisionnement peuvent créer des perturbations dans le fonctionnement d'un grand nombre d'industries européennes et, de ce fait, mettre en danger le développement durable de l'Union européenne.

La situation est rendue plus complexe encore par l'introduction, par certains pays tiers, de restrictions aux exportations d'un nombre non négligeable de matières premières. Cette situation peut être doublement préjudiciable pour l'industrie européenne : d'une part, la difficulté d'accès aux matières premières peut mettre en cause l'activité même de production. D'autre part, les politiques de restriction des exportations appliquées par certains pays confèrent à leurs entreprises situées en aval un avantage concurrentiel déloyal sur les marchés internationaux.

La stratégie de la Commission, en matière de commerce international, est triple. Elle consiste : a) à mettre au point et à négocier des accords en ce qui concerne les matières premières dans les négociations en cours et futures, b) à assurer le respect des engagements internationaux pris tant au niveau multilatéral que bilatéral concernant les matières premières et, enfin, c) à lancer des *soft measures* afin d'établir des alliances et de sensibiliser nos partenaires commerciaux.

Dans ce contexte, une mesure importante et concrète pour l'application de cette stratégie a consisté en la demande faite par la Commission, en 2009, de consultations auprès de l'OMC au sujet de restrictions à l'exportation mises en place par la Chine pour une liste de neuf matières premières dont la bauxite, le manganèse et le zinc. En raison de la réponse négative faite par la Chine, un Panel a été établi en janvier 2010.

La Commission considère qu'un dialogue avec les principaux pays tiers reste une priorité. Ce dialogue doit être conduit avec les pays industrialisés, mais aussi avec les pays en voie de développement et les économies émergentes. Par ailleurs, l'importance du recours aux enceintes multilatérales (telles que l'OCDE, la Banque Mondiale, etc.) pour pousser les discussions sur ces sujets ne doit pas être négligée.

Un aspect important de la stratégie de la Commission tient à la mise en œuvre de sa *politique de développement*. Beaucoup de pays en développement, en particulier en Afrique, sont riches en ressources naturelles et trouvent là de nouvelles possibilités d'accroître sensiblement leur revenu national, étant donné qu'un grand nombre d'entre eux souffre toujours de la pauvreté ou d'une faible croissance. Toutefois, certains de ces pays sont confrontés à des conflits violents, qu'une lutte pour le contrôle des ressources naturelles alimente parfois ; d'autres pâtissent de mauvaise gouvernance, notamment en ce qui concerne la distribution des revenus générés par ces ressources.

A cet égard, les politiques de développement de l'Union européenne peuvent jouer un rôle déterminant et ce, sur trois plans :

- ✓ le renforcement des États : la gouvernance économique, sociale, environnementale et politique est un facteur de développement important ;
- ✓ la favorisation d'un climat d'investissement sain ;
- ✓ l'encouragement à une gestion durable des matières premières.

Par ailleurs, l'expertise dont dispose l'Europe grâce aux services géologiques nationaux de ses pays membres peut apporter un élément unique de coopération contribuant au transfert de connaissances et de compétences et, ainsi, au développement de ces pays partenaires.

## Conclusion

*Last but not least...* Nous le mentionnons pour conclure, mais cela est non moins important. Dans toutes les considérations susmentionnées, un élément majeur doit être retenu : la Commission européenne peut certes créer des conditions favorables à la mise en œuvre d'une stratégie, mais elle ne peut se substituer aux initiatives directes qui doivent émerger de la société civile (entreprises, universités, centres de recherche, organisations non gouvernementales ou collectivités locales).

Cela serait impossible sans une impulsion des États-membres, qui doivent inciter au débat entre les divers acteurs et, en même temps, prendre les initiatives s'avérant les plus en adéquation avec les intérêts et les conditions spécifiques de chaque pays et de chaque région partenaires.

Le fait que le Conseil des ministres de l'UE ait accordé à plusieurs reprises son soutien à l'Initiative de la Commission que nous avons mentionnée est de bon augure pour la mise en œuvre de cette stratégie. Il faut espérer que ces indications seront suivies des actes appropriés.

La France, qui a une histoire riche en traditions au niveau de l'excellence de ses compétences minières, pourra sûrement apporter une contribution unique à un débat, qui est aussi devenu européen.

## Notes

\* Commission européenne.  
Chef d'unité à la DG Entreprises et industrie.

(1) Nota bene : Cet article est une adaptation libre et résumée d'un document de la Commission européenne.

Seul le texte officiel exprime le point de vue officiel de la Commission ; il est disponible à l'adresse ci-après : [http://ec.europa.eu/enterprise/non\\_energy\\_extractive\\_industries/raw\\_materials.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/non_energy_extractive_industries/raw_materials.htm)

(2) [http://ec.europa.eu/enterprise/non\\_energy\\_extractive\\_industries/raw\\_materials.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/non_energy_extractive_industries/raw_materials.htm)

(3) *Analysis of the competitiveness of the non-energy extractive industry in the EU*, Bruxelles, 04.06.2007, SEC (2007) 771 (200 p.) : [http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/metals-minerals/files/sec\\_2007\\_771\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/metals-minerals/files/sec_2007_771_en.pdf)

# Les ressources minérales : un atout pour le développement de l'Afrique subsaharienne ?

La question de savoir si les ressources minérales et les hydrocarbures sont un atout pour les pays en développement, en particulier pour l'Afrique subsaharienne, fait depuis quinze ans l'objet d'un débat de plus en plus vif. Nous examinerons ici la manière dont les ressources minérales peuvent avoir des effets bénéfiques sur le développement des pays d'Afrique subsaharienne.

par Paulo de SA\* et Gary McMAHON\*\*

## Introduction

La question de savoir si les ressources minérales et les hydrocarbures sont un atout pour les pays en développement, en particulier pour l'Afrique subsaharienne, fait depuis quinze ans l'objet d'un débat de plus en plus vif. L'origine de ce débat remonte beaucoup plus loin dans le temps, mais il s'est amplifié après la publication d'un rapport de Sachs et Warner (1997) qui tentait d'apporter la preuve statistique que l'abondance des ressources naturelles avait un impact négatif sur la croissance économique à long terme. Ce débat n'était pas seulement académique : il intervenait à une époque où de nombreux pays en développement, tournant le dos à diverses stratégies d'industrialisation, s'orientaient vers des politiques de croissance axées sur leur avantage comparatif, généralement dans le secteur de la production primaire (là encore, surtout en Afrique subsaharienne).

Le débat s'est rapidement déplacé, passant de la fiabilité statistique des effets de la dépendance à l'égard des ressources minérales et des hydrocarbures sur la croissance aux raisons pour lesquelles nombre de pays pourtant riches en ressources naturelles affichaient une faible croissance (1). De l'avis général, ces pays étaient victimes de la « malédiction des ressources naturelles », une « malédiction » essentiellement due à l'impact de cette abondance de ressources « localisées » sur la politique économique d'un pays donné. Lorsqu'une telle richesse est concentrée uniquement dans quelques régions, les élites (anciennes et nouvelles) font preuve d'une tendance à être les premières à en bénéficier, au lieu d'essayer de mettre ces ressources au service du développement national. Cela a souvent été à l'origine de conflits entre les différents groupes cherchant à contrôler les ressources naturelles d'un pays, en particulier lorsque celles-ci étaient concentrées spatialement dans un nombre limité de régions dudit pays.

Nous examinerons ici la manière dont les ressources minérales peuvent avoir des effets bénéfiques sur le déve-

loppement des pays d'Afrique subsaharienne (2), en mettant l'accent sur les types de politiques et de programmes nécessaires pour surmonter les problèmes de gouvernance liés aux industries extractives et pour permettre à un pays de tirer le meilleur parti possible du développement de son secteur minier. Cette analyse repose sur la « chaîne de valeur » des industries extractives, qui regroupe un ensemble de mesures allant des politiques et programmes destinés à attirer des investissements dans le secteur minier jusqu'aux politiques et programmes dont la mise en place est nécessaire pour que ce secteur puisse contribuer au développement durable du pays.

La section suivante présentera brièvement quelques données soulignant l'importance du secteur minier en Afrique subsaharienne, et donnera un aperçu succinct des principales raisons pour lesquelles la présence d'abondantes ressources minérales peut constituer (ou non) un atout pour les pays à faible revenu. La deuxième partie examinera les différentes conditions devant être réunies pour que le secteur minier puisse contribuer au développement durable, ainsi que les tendances sectorielles actuelles en Afrique subsaharienne. La troisième et dernière partie, enfin, présentera des conclusions et des recommandations.

## Le secteur minier en Afrique

Dans un pays riche en ressources minérales, les principaux obstacles à la croissance des investissements sont l'instabilité macroéconomique et la fragilité des institutions, ainsi qu'un cadre juridique et réglementaire peu favorable au développement du secteur extractif. La plupart des pays miniers d'Afrique ont pris des mesures visant à la stabilisation macroéconomique, qu'il s'agisse de politiques budgétaires, du contrôle de l'inflation, de la réduction des déficits de la balance des paiements ou encore du maintien de taux de change compétitifs (une question au centre des préoccupations de la plupart des compagnies minières). Sur le plan sectoriel, presque tous les pays d'Afrique ont entrepris

Pays	Recettes fiscales (en % des recettes totales)	Recettes d'exportation (en % des exportations totales de marchandises)
République démocratique du Congo	18,3 (2007)	54,0
Ghana	4,7	34,5
Guinée	19,3 (2008)	85,6
Sierra Leone	1,0	64,1
Zambie	8,9 (2007)	66,2
Namibie	7,7	60,3
Botswana	44,0	77,5
Afrique du Sud	1,8	21,2
Libéria	8,3	51,9

**Tableau 1 :** Contribution du secteur minier aux recettes fiscales et d'exportation de certains pays d'Afrique subsaharienne (moyennes non pondérées, 2000-2007, sauf indication contraire).

Source : Estimations du FMI.

d'importantes réformes dans la législation, la réglementation et les institutions de leur secteur minier et ce, pour attirer des investissements. Le net accroissement de l'investissement enregistré dans ce secteur dans la plupart des pays du continent africain montre la réussite de ce type de politiques destinées à inciter les compagnies minières à y investir.

Le tableau 1 montre la contribution du secteur minier aux grandes variables macroéconomiques dans un certain nombre de pays africains sur la période 2000-2007. Ces chiffres sous-estiment la contribution du secteur à l'ensemble de l'économie, car ils ne rendent pas pleinement compte de l'impact de l'augmentation des prix intervenue depuis 2004. Le tableau 2 montre le poids économique actuel et prévu du secteur minier en Tanzanie et au Burkina Faso, deux nouveaux pays miniers africains.

Face à l'envolée des cours des métaux (et tout donne à penser que ceux-ci se maintiendront encore pendant un certain temps au-dessus des moyennes historiques, en termes réels), de nombreux pays ont estimé qu'ils n'étaient pas en train de recevoir une part équitable des recettes d'exploitation de leur secteur minier. Certains d'entre eux ont pris des mesures pour remédier à cette situation. Ils ont enclenché des processus de renégociation des contrats existants et ont posé des conditions à la signature de nouveaux contrats plus avantageuses pour le pays. On note une évolution vers des régimes fiscaux plus progressifs et le recours à une échelle mobile pour le calcul des redevances, le pourcentage des recettes versées à l'État évoluant comme les prix des minerais. Bien utilisées, ces recettes supplémentaires pourraient servir à financer le développement durable du pays (en investissant dans la formation, dans l'éducation, les infrastructures et d'autres activités complémentaires de l'investissement privé) ; dans le cas contraire, elles risqueraient de contribuer à une exacerbation de la « malédiction des ressources naturelles ».

D'un point de vue purement technique, l'abondance des ressources naturelles d'un pays devrait être un atout pour

son développement économique. Les richesses minérales attirent des investissements qui favorisent l'adoption de technologies nouvelles, et elles permettent d'accroître les réserves de change et les recettes fiscales. En outre, l'investissement minier nécessite souvent de nouveaux équipements, ce qui a des effets induits sur d'autres secteurs et crée des liens, en amont et en aval, mais aussi et, surtout, des liens horizontaux (sous-traitance) qui contribuent à la création d'emplois et de revenus.

Cependant, de nombreux pays africains ont fait le constat que ce scénario ne s'est pas véritablement concrétisé et que le secteur minier n'a eu qu'un faible impact sur les conditions de vie de l'ensemble de la population et ce, pour différentes raisons. D'une part, certaines opérations minières ont des effets nocifs sur l'environnement, qui sont exacerbés par le manque de moyens pour surveiller l'application du droit et le respect de la réglementation de l'environnement. D'autre part, l'augmentation des entrées de devises a parfois eu une incidence sur le taux de change réel, réduisant la compétitivité d'autres secteurs et ralentissant l'industrialisation du pays sur le long terme. Il y a cependant peu de données qui permettraient de conclure qu'un nombre élevé de pays miniers africains auraient particulièrement souffert de ce syndrome hollandais. En fait, une raison essentielle du ralentissement de leur taux de croissance économique est le retard que ces pays ont pris dans la mise en place de politiques et programmes indispensables à leurs entreprises locales pour mieux profiter du développement du secteur minier : cette situation s'est traduite par des opérations « enclavées » sans véritables liens avec le reste de leur économie.

En dépit du manque de rapport économique direct entre l'exploitation minière et les autres secteurs de leur économie, les pays d'Afrique qui ont enregistré la plus forte croissance au cours des dernières années sont généralement ceux qui ont le plus développé leur secteur extractif. Les exemples de pays comme le Botswana, le Chili, les Émirats Arabes Unis, l'Australie, le Canada et la Norvège montrent

Pays	IED dans le secteur minier	Exportations 2000	Exportations 2008	Prévisions d'exportations 2015	Recettes fiscales (en % des recettes totales), 2008	Recettes fiscales prévues (en % des recettes totales), 2015
Burkina Faso	900 millions (2005-10)	<20 millions	100 millions	1,6 milliard	1,8 %	30 %-40 %
Tanzanie	1,7 milliard (2005-07)	100 millions	840 millions	1,4 milliard (or seulement)	3,7 % (2007)	7 %

**Tableau 2 :** Statistiques minières du Burkina Faso et de la Tanzanie (pour différentes années, comme indiqué – en dollars américains).

Source : Estimations d'Alan Roe (Tanzanie), Conseil international des mines et des métaux (*International Council of Mining and Metals - ICMM*) ; estimations de Gary McMahon (Burkina Faso), Banque mondiale.

que la malédiction des ressources n'est pas inévitable. Quand le secteur minier d'un pays est géré de manière transparente, en mettant l'accent sur l'atténuation des problèmes environnementaux et sociaux et la maximisation des liens économiques, ce secteur peut contribuer effectivement au développement durable du pays considéré. Le reste de cette étude examinera les conditions requises pour que l'exploitation des ressources minérales d'un pays donné puisse apporter une contribution importante au développement durable de celui-ci.

### Conditions nécessaires pour que les ressources minérales deviennent un atout

Comme nous l'avons mentionné en introduction, notre analyse suivra la chaîne de valeurs des industries extractives, les pays franchissant cinq étapes (ou maillons) successives dans la transformation de leur richesse minière en développement durable, à savoir : 1) l'accès aux ressources (octroi de permis et de concessions) ; 2) le suivi des opérations (développement des institutions du secteur extractif) ; 3) le recouvrement des impôts et redevances afférents à cette activité ; 4) la gestion et l'allocation des revenus et, enfin, 5) la mise en œuvre de politiques et de projets permettant une utilisation efficiente des ressources naturelles nationales au service de projets de développement durable (3).

La première condition requise, sans laquelle l'abondance de ressources minérales n'aurait pratiquement aucun impact économique, est l'adoption d'un cadre juridique, réglementaire et fiscal, favorisant l'investissement dans le secteur et garantissant que la procédure d'octroi de permis et de concessions soit transparente et équitable (premier maillon de la chaîne de valeur). La réforme du cadre juridique et réglementaire du secteur et l'établissement de cadastres miniers transparents permettant une procédure équitable d'octroi des permis, se sont traduits par un net accroissement de l'investissement minier dans tous les pays d'Afrique subsaharienne (voir les exemples de la Tanzanie et du Burkina Faso – tableau 2). En raison d'un faible niveau des prix des minerais pendant près de trois décennies (jusqu'en 2004), les taux d'imposition fiscale sont restés relativement faibles, mais ils ont été ajustés en fonction de la rentabilité du secteur observée au cours des dernières années, notamment en appliquant une échelle mobile à la

détermination des taux des redevances. La stabilité des régimes fiscaux (qui peut être tout aussi importante que les taux d'imposition pour les investisseurs) (4) reste cependant une source d'inquiétude, dans certains pays.

La deuxième condition requise est la mise en place de moyens adéquats de contrôle et d'application de la réglementation (deuxième maillon de la chaîne de valeur). En effet, si la réglementation environnementale, son contrôle et son application ne sont pas adéquats, les opérations minières n'auront aucun effet positif durable. Presque toutes les lois et réglementations minières actuellement en vigueur en Afrique subsaharienne prévoient des mesures appropriées de protection de l'environnement, complétées, dans bien des cas, par des garanties financières destinées à couvrir les coûts de réhabilitation des terrains, après la fermeture des mines. Malgré l'amélioration sensible des capacités de suivi et d'application de ces règles, beaucoup reste à faire dans la plupart des pays de la région. Cela étant, la société civile a contribué, pour beaucoup, à la dissémination des préoccupations environnementales spécifiques au secteur minier.

La troisième condition requise est la mise en place d'un système transparent et efficace de recouvrement des recettes fiscales (troisième maillon de la chaîne de valeur). Si le système fiscal est trop compliqué et le recouvrement des recettes opaque, les facteurs politico-économiques risquent de l'emporter sur le reste, et la « malédiction des ressources » deviendra une réalité. Ces dernières années, l'adhésion à l'Initiative pour la Transparence des Industries Extractives (ITIE), dans le cadre de laquelle les entreprises minières et les pouvoirs publics déclarent à des auditeurs indépendants ce qu'ils ont chacun payé et encaissé, a été le principal moyen de lutte contre ce type de corruption. À l'heure actuelle, quarante-et-un pays participent à cette initiative, dont vingt-cinq pays africains. Bien qu'il soit encore trop tôt pour évaluer les résultats de l'ITIE, l'obligation de faire intervenir des acteurs représentant toutes les parties prenantes de la société pousse les entreprises et les pouvoirs publics à déclarer des chiffres exacts. Pour améliorer l'efficacité du recouvrement des impôts, la collecte en a été simplifiée, mais la plupart des pays de la région ont encore beaucoup à faire pour renforcer leurs capacités dans ce domaine, notamment en matière de formation de fiscalistes spécialisés dans les industries extractives.



© Ron Giling/LINEAIR-BIOSPHOTO

« La stabilité des régimes fiscaux (qui peut être tout aussi importante que les taux d'imposition pour les investisseurs) reste cependant une source d'inquiétude, dans certains pays. La Zambie, par exemple, a instauré un impôt très lourd sur les bénéfices exceptionnels en 2008, mais elle l'a supprimé à la fin de l'année 2009, par crainte de décourager l'investissement ». Mineurs dans une mine de cuivre en Zambie.

Si ces trois premières conditions sont réunies, le développement du secteur minier peut effectivement contribuer au développement durable et ce, de trois manières. Tout d'abord, les recettes fiscales générées par le secteur peuvent être affectées, dans le budget de l'État, à des activités de développement. Ensuite, le secteur minier peut devenir un moteur de la croissance, grâce à la création de liens en amont, en aval et horizontaux (sous-traitance), ainsi que grâce à des transferts de technologie. Enfin, et tout particulièrement dans le cas des ressources minérales exploitées à grande échelle (métaux ferreux et de base), les grands projets d'infrastructure créent des externalités qui peuvent représenter une source de croissance pour les autres secteurs de l'économie. Ces trois conditions accessoires viennent s'ajouter aux trois principales, énoncées auparavant.

Pour que les ressources minérales soient un atout pour les pays d'Afrique subsaharienne, la quatrième condition est que les pouvoirs publics soient en mesure de gérer et d'affecter de manière efficace les recettes fiscales retirées de l'exploitation de leur secteur extractif (quatrième maillon de la chaîne de valeur), de façon à contribuer au développement durable (cinquième maillon de la chaîne de valeur). Le point de départ est souvent l'élaboration de stratégies de réduction de la pauvreté, mais le passage réussi du développement du secteur minier au développement durable d'un pays dépend, dans une large mesure, d'une bonne gouvernance de celui-ci. Pour faire face à ce défi, il faut à la fois renforcer les capacités de gestion de recettes dont l'aug-

mentation est souvent importante et s'attaquer aux facteurs politico-économiques qui tendent à faciliter l'accaparement des revenus miniers par des intérêts privés (5).

La cinquième condition est le renforcement des liens du secteur minier avec le reste de l'économie (cinquième maillon de la chaîne de valeur). Cette stratégie consiste souvent à commencer à pourvoir les postes spécialisés dans les mines, puis à confier, à moyen terme, à des firmes nationales la fourniture de biens et services aux compagnies minières. A plus long terme, il faut diffuser le savoir-faire et les connaissances technologiques acquis par le secteur minier dans d'autres industries, comme l'ont fait le Chili, l'Afrique du Sud, le Canada et l'Australie. Les lois minières récentes contiennent généralement des dispositions visant à procurer des avantages aux collectivités locales ou à des entités nationales, en matière de recrutement, de sous-traitance, de formation et, dans certains cas, de fourniture de biens et de services au secteur minier. En général, ces mesures sont renforcées progressivement. Elles se sont avérées très efficaces pour créer des emplois dans le secteur minier, ainsi qu'un réseau de fournisseurs locaux.

Presque tous les pays à faible revenu souffrent d'un grave manque d'infrastructures, souvent parce que la demande ne justifie pas les lourds investissements nécessaires pour réaliser des économies d'échelle. La sixième condition à remplir pour tirer parti du développement du secteur minier est qu'une partie des ressources naturelles soit transformée en infrastructure (cinquième maillon de la chaîne de valeur). Le

développement du secteur minier peut soutenir la mise en place d'infrastructures et créer d'importantes externalités pour d'autres secteurs. Au besoin, les recettes fiscales générées par le secteur extractif peuvent fournir les fonds de contrepartie nécessaires à l'instauration de partenariats public-privé dans ce secteur. L'intérêt du « modèle chinois » d'investissement dans le secteur minier réside dans le fait que celui-ci s'accompagne souvent de vastes projets d'infrastructures, qui permettent de contourner, dans une certaine mesure, des problèmes de gouvernance.

Il va de soi que les trois dernières conditions sont rarement indépendantes les unes des autres.

### Conclusions et recommandations

Il apparaît que jusqu'à la fin du XX<sup>e</sup> siècle, les ressources minérales n'ont pas été un atout majeur pour le développement économique et social des pays d'Afrique. A l'exception de quelques pays du Sud du continent africain, les pays miniers de ce continent ont connu une croissance et un développement socioéconomique lents. Cependant, la croissance s'est accélérée, dans ces pays, grâce à la reprise de l'investissement dans le secteur minier, après la réforme du secteur et à la suite de la hausse des prix des ressources minérales constatée depuis 2003.

Des progrès sensibles ont été obtenus au niveau du premier maillon de la chaîne de valeur des industries extractives, comme en témoigne l'augmentation des investissements privés, avec des progrès passables ou satisfaisants constatés au niveau des deuxième et troisième maillons et ce, bien que les taux d'imposition fiscale restent, dans certains pays, à des niveaux relativement faibles.

Le défi auquel se heurtent la plupart des pays d'Afrique riches en ressources minérales est celui de parvenir à surmonter les problèmes de capacité institutionnelle ainsi que les obstacles politiques qui empêchent la transformation des recettes fiscales dégagées par le secteur minier en d'autres formes de capital. Au niveau macroéconomique, il convient d'harmoniser le développement du secteur minier avec celui des autres secteurs ayant un fort potentiel de

croissance. Au niveau sectoriel, il s'agit d'étendre les avantages tirés des opérations minières aux activités situées en amont et en aval, ainsi qu'à celles de la sous-traitance, en accordant généralement la priorité à ces dernières. Toutes ces initiatives nécessiteront l'amélioration de la gouvernance à tous les niveaux de l'administration des pays concernés.

### Notes

\* Directeur sectoriel, Banque mondiale.

\*\* Spécialiste senior des mines, Division des politiques pour les secteurs des hydrocarbures et des mines, Banque mondiale.

(1) Voir, par exemple, Auty (2001).

(2) Nous n'examinons pas ici les hydrocarbures, qui ont des caractéristiques et des effets différents de ceux des ressources minérales.

(3) Pour un examen approfondi de la chaîne de valeur des industries extractives, voir Mayorga Alba (2009).

(4) La Zambie, par exemple, a instauré un impôt très lourd sur les bénéfices exceptionnels en 2008, mais elle l'a supprimé à la fin de l'année 2009, par crainte de décourager l'investissement. Néanmoins, ce pays a également introduit, en 2008, un impôt sur les sociétés plus progressif, qui frappe beaucoup plus lourdement les bénéfices exceptionnels.

(5) Pour un examen approfondi de l'économie politique de la réforme, voir Fanelli et McMahon (2006).

### Bibliographie

AUTY (Richard) (ed.), *Resource Abundance and Economic Development*, Oxford: Oxford University Press, 2001.

FANELLI (José) & McMAHON (Gary), *Understanding Market Reforms, Volume 2: Motivation, Implementation and Sustainability*, Londres : Palgrave Macmillan, 2006.

MAYORGA ALBA (Eleodoro), *Extractive Industries Value Chain*, Extractive Industries for Development Series #3, Banque Mondiale, Washington, 2009.

SACHS (Jeffrey) & WARNER (Andrew), *Natural Resource Abundance and Economic Growth*, Document de travail, Harvard University, Cambridge, MA, 1997.

## Le lithium : un métal stratégique

Les deux principaux relais de croissance du marché du lithium à moyen terme seront les batteries des systèmes embarqués et les batteries de véhicules électriques. La presse annonce même l'avènement d'un futur « Moyen-Orient du lithium », dans la région de l'Altiplano andin située entre la Bolivie, l'Argentine et le Chili.

par Antoine GOUZE\*

Le lithium est un métal mou, blanc argenté. C'est le plus léger de tous les éléments chimiques solides à la température ambiante (il est deux fois moins dense que l'eau). C'est aussi le solide ayant la plus grande chaleur massique. En solution, on le trouve sous forme d'ion  $\text{Li}^+$ . Son grand potentiel électrochimique et sa densité énergétique élevée lui confèrent des propriétés uniques permettant de stocker et de transporter des charges électriques importantes dans des systèmes embarqués.

Les constructeurs automobiles s'intéressent de près à ce métal, car il pourrait constituer un élément stratégique dans la fabrication des véhicules électriques. La presse annonce même l'avènement d'un futur « Moyen-Orient du lithium », dans la région de l'Altiplano andin située entre la Bolivie, l'Argentine et le Chili.

En tant que composant de batteries à haute densité énergétique, le lithium est susceptible d'apporter un élément de réponse, dans la lutte contre le réchauffement climatique. A ce sujet, l'industrie automobile se montre très optimiste. Des incertitudes demeurent, néanmoins, et l'Eldorado annoncé pourrait, hélas, ne rester qu'une illusion.

### Le marché actuel du lithium

#### La demande

En 2008, la consommation apparente de lithium (exprimée en métal lithium contenu) a été estimée à 22 000 tonnes.

Le lithium est utilisé dans de nombreuses applications industrielles : verres et céramiques, produits de graissage, pharmacie, coulée continue, fusion de l'aluminium, piles et batteries rechargeables... Ces applications sont très diverses (cf. la figure 1).

De 6 %/an en moyenne depuis 2000, la croissance régulière du marché du lithium, a été assez soutenue, et s'est décomposée en trois phases :

- + 3,5 % de 2000 à 2003,
- + 8,4 % de 2004 à 2007,
- + 3,8 % en 2008.

Les batteries au lithium ont commencé à remplacer les piles nickel-cadmium (NiCd) et nickel-hydrure métallique

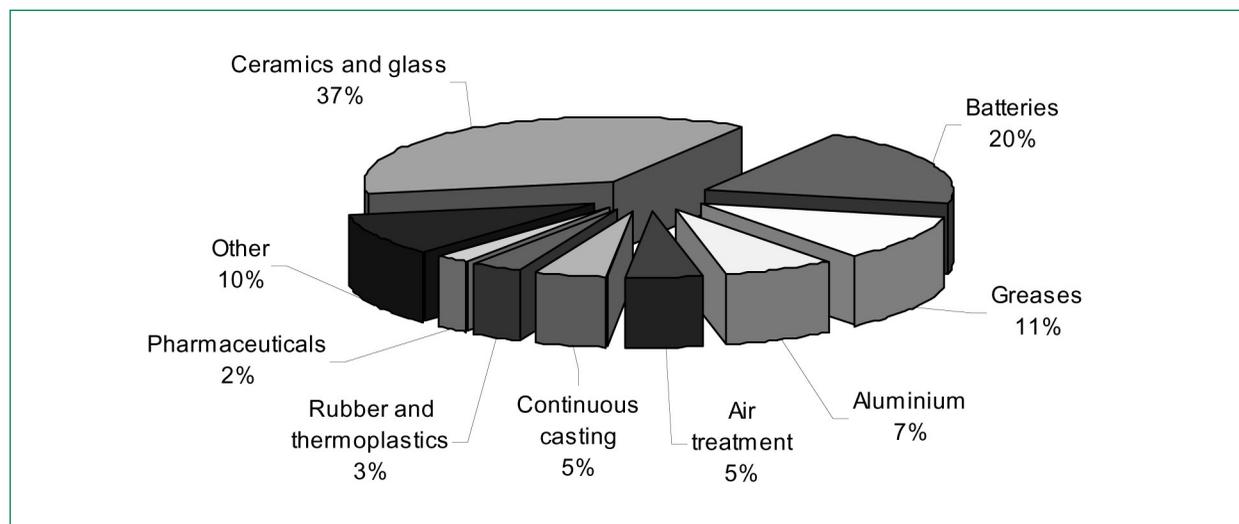


Figure 1 : Consommations de lithium par utilisation finale, 2008.

Source : Roskill - The economics of Lithium 2009.

(Ni-MH) dans les années 2000. Le marché de l'énergie portable pour les appareils photographiques, les téléphones mobiles et les ordinateurs portables représente environ 20 % de la demande.

En 2009, la demande a chuté brutalement, du fait de la crise économique et de la chute généralisée de la production industrielle. Il est à noter que jusqu'en 2020, la demande en lithium liée à l'automobile sera vraisemblablement quasi nulle, les véhicules hybrides actuels utilisant des batteries Ni-MH.

### Le prix du lithium sur le marché

L'unité servant de référence est l'équivalent carbonate de lithium (LCE), qui est la forme la plus commercialisée du lithium. 5,23 tonnes de carbonate de lithium équivalent (LCE) contiennent 1 tonne de lithium métallique.

Le prix du LCE a connu une courbe « en U », affectée d'un décrochement ces derniers mois. Les phases de son évolution sont les suivantes :

- ✓ un palier à 3 000 \$/tonne, entre 1990 et 1996,
- ✓ une descente jusqu'à 1 500 \$/t, de 1997 à 1998,
- ✓ un plateau à hauteur de 1 500 \$/t, de 1999 à 2004,
- ✓ une remontée, progressive, jusqu'à 6 000 \$/tonne, de 2005 à la mi-2009,
- ✓ une réduction de 20 % au cours des derniers mois, 4 500 \$/tonne en janvier 2010 (cf. les figures 2 et 3).

### Offres : les ressources minières et la production du lithium

#### Les ressources minières

On trouve le lithium principalement sous deux formes :

- ✓ une forme dissoute, dans les aquifères de certains déserts de sel (Chine, Amérique Latine, Etats-Unis),

- ✓ une forme solide de mica à spodumène (cf. le tableau 1).

Suivant les sources, les estimations des ressources divergent. Elles atteignent 11,5 millions de tonnes de lithium, d'après *The United States Geological Survey* (USGS) (les services d'information Roskill et le *National Resources Council Report* les évaluent, quant à eux, à 28 millions de tonnes). Selon ces estimations, les ressources saumurales représenteraient entre 60 % et 80 % des ressources totales et le Salar d'Uyuni, en Bolivie, en représenterait à lui seul entre 20 % et 50 %. Certaines estimations récentes évaluent les ressources à plus de 35 millions de tonnes de lithium.

#### Comment expliquer cette divergence entre ces estimations ?

L'intérêt pour le lithium est récent et il existe de nombreuses incertitudes, ainsi que plusieurs possibilités de présence de lithium dans différents milieux.

La découverte des principaux gisements date des années 1970. Pour la plupart de ces gisements, le code JORC (*Joint Ore Reserve Code*) n'est pas appliqué. La méthodologie d'exploration de ces gisements s'apparente, d'ailleurs, davantage à celle des réservoirs de pétrole qu'à celle d'un gisement de minerai.

Ainsi, à Uyuni, par exemple, des travaux d'exploration menés dans les années 1980 par l'Orstom (Office de la Recherche Scientifique et Technique Outre-Mer), devenu aujourd'hui l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) ont eu pour principal objet la découverte de lithium. La porosité de la croûte saline lithifère n'a pas été mesurée de façon précise. La majeure partie des investigations a porté sur la première couche de sel, d'une épaisseur de 10 mètres. Deux forages profonds et des essais géophysiques ont depuis démontré que de nombreuses couches

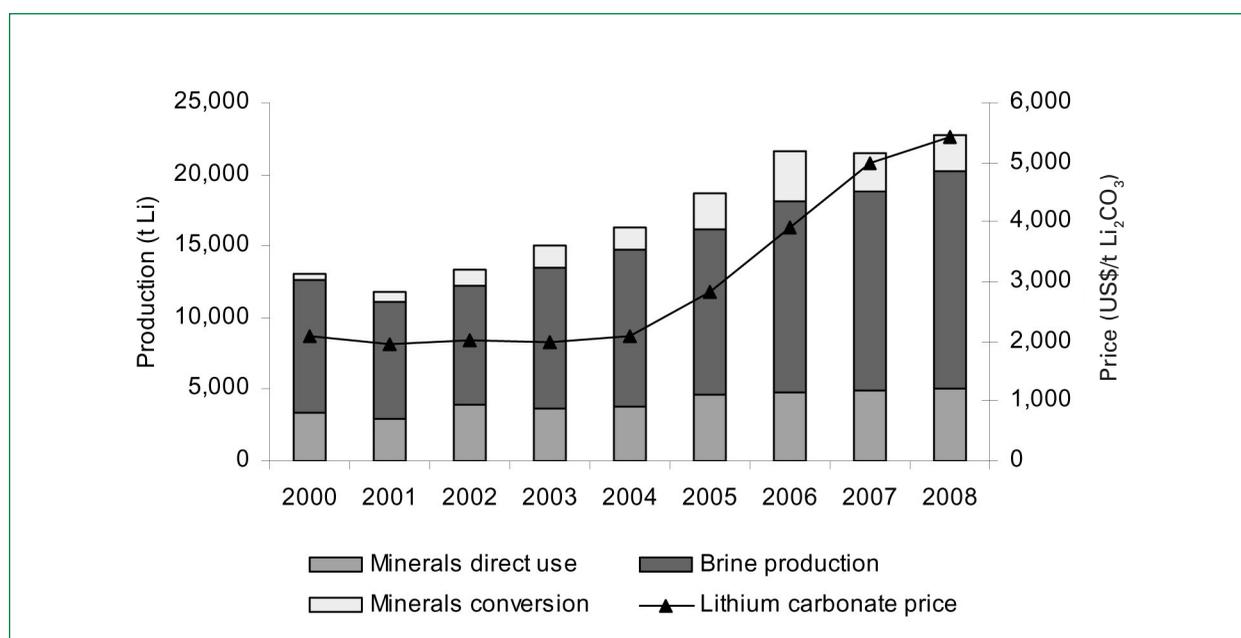


Figure 2 : Production et prix du lithium, 2000-2008.

Source : Roskill - The economics of Lithium 2009.

Note : Lithium carbonate price reflects average value of lithium carbonate exported from Argentina, Chile and China.

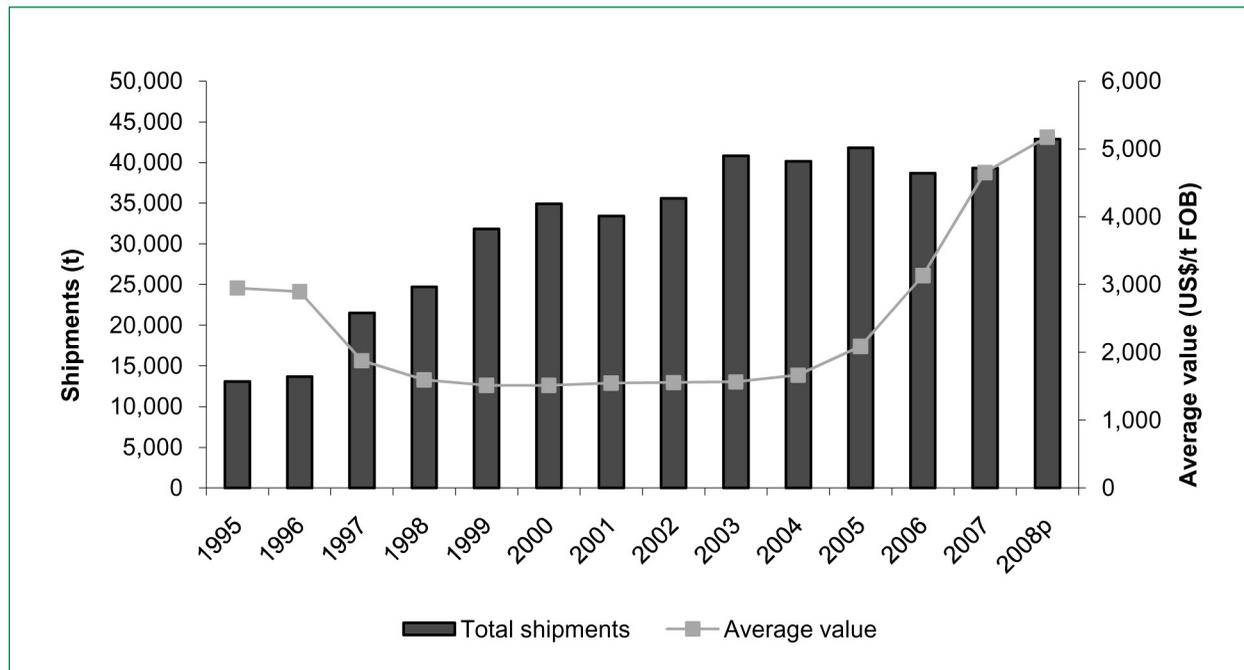


Figure 3 : Chargements maritimes de carbonate de lithium au Chili, 1995-2008.

Source : Roskill – The economics of Lithium 2009.

Note : p = projected 2008 shipments and average values based on January to August 2008 exports.

	USGS		Roskill Reserves	Garrett Reserves	NRC Reserves & Resources
	Reserves	Reserve base			
Argentina	...	...	6,000	800	2,710
Australia	160	260	190	150	263
Austria	...	...	113	10	100
Bolivia	-	5,400	5,500	5,000	5,500
Brazil	190	910	50	3	85
Canada	180	360	151	240	256
Chile	3,000	3,000	6,800	3,000	6,900
China	540	1,100	5,400	2,500	3,350
DRC	...	...	...	309	2,300
Finland	...	...	13	...	14
Ireland	...	...	61	...	...
Israel	...	...	2,500 <sup>1</sup>	2,000	...
Mali	...	...	...	26	...
Namibia	...	...	...	10	...
Portugal	...	...	10	10	...
Russia	...	...	81	130	1,000
Serbia	...	...	957 <sup>1</sup>	850	...
Spain	...	...	72	...	...
USA	38	410	...	2,703	5,936
Zimbabwe	23	27	...	23	57
<b>Total (rounded)</b>	<b>4,131</b>	<b>11,467</b>	<b>27,843</b>	<b>17,764</b>	<b>28,471</b>

Tableau 1 : Réserves de lithium par pays (en milliers de tonnes de lithium métal).

Source : USGS – Mineral Commodity Summaries, 2008; Roskill – Section 4; Garrett, 2004 – Handbook of Lithium and Natural Calcium Chloride (reserves from various sources); National Research Council (NRC) – 1985.

Notes : 1 – Resources.

poreuses de sel et de sédiments sont imprégnées de saumure lithifère.

Les ressources chinoises sont méconnues et leur évaluation est encore très approximative ; elles pourraient constituer des ressources bien plus importantes que celles de la Bolivie. Le *National Resource Council* les estime supérieures à celles de la Bolivie (respectivement 24 % et 19 % des réserves mondiales).

La présence de lithium dans des saumures géothermales (en Amérique du Nord) ne sont pas comptabilisées ; elles pourraient néanmoins constituer des ressources équivalant à 20 millions de tonnes de lithium supplémentaires.

### La production

Au milieu des années 1990, l'offre de lithium a été profondément restructurée. La production de lithium à partir de saumures a supplanté quasi totalement l'extraction de lithium à partir de spodumène.

Aujourd'hui, 75 % de la production mondiale provient de deux salars de la Cordillère des Andes : celui d'Atacama (au Chili) et celui d'Hombre Muerto (en Argentine). Les 25 % restants se répartissent essentiellement entre la production chinoise (à partir de saumures) et la production à partir de spodumène (en Australie).

#### Les procédés d'extraction à partir de saumure

A Atacama, la saumure lithifère est concentrée par évaporation naturelle, grâce à des conditions climatiques exceptionnelles : air sec, vents violents et radiation solaire intense (le taux d'évaporation naturelle est supérieur à 99,5 % !).

Le lithium est ensuite précipité sous forme de carbonate. Si la composition de la saumure est plus complexe, ou si les conditions climatiques sont moins favorables, un procédé physico-chimique de séparation complète l'évaporation solaire. Ainsi, par exemple, un procédé d'adsorption est utilisé en Argentine, dans le salar d'Hombre Muerto.

#### Le procédé d'extraction du lithium à partir de spodumène

Le spodumène est calciné, dissous en milieu acide, puis précipité sous forme de carbonate. Le lithium produit selon ce procédé (essentiellement utilisé en Australie) représente moins de 20 % du marché. Certaines applications industrielles du lithium, dans les secteurs de la céramique et du verre, ne peuvent utiliser que des formes minérales du lithium (car elles nécessitent une certaine teneur en silice) : dans de tels cas, le procédé d'extraction n'est pas poussé jusqu'à l'obtention de carbonate (cf. la figure 4).

### Les perspectives du marché du lithium

#### L'utilisation du lithium dans les batteries de véhicules électriques

Pour mieux comprendre les perspectives du marché du lithium, arrêtons-nous un instant sur la technologie actuel-

le des batteries au lithium destinées aux véhicules électriques. Ces batteries sont constituées de trois éléments :

- ✓ une anode (en général en carbone),
- ✓ un électrolyte (un sel de lithium en solution),
- ✓ une cathode (composée notamment de lithium et de métal oxydés).

Suivant les propriétés recherchées, le lithium sera plus ou moins prépondérant en fonction des performances de la batterie.

Les différents types de batteries au lithium se caractérisent par des capacités différentes, en termes de :

- ✓ puissance spécifique (exprimée en W/kg) ou densité énergétique, qui correspond à la capacité d'accélération du véhicule,
- ✓ l'énergie spécifique, (exprimée en Wh/kg), qui correspond au niveau d'autonomie de la batterie (cf. la figure 5).

Il existe trois types de batteries destinées à l'électrification des automobiles (en fonction de leur taux d'hybridation) :

#### Les batteries pour véhicules hybrides (HV)

Les véhicules hybrides ne se servent de l'énergie électrique emmagasinée dans leur batterie que lors des phases de démarrage ou lors de courts déplacements urbains, la batterie se rechargeant lors des phases de freinage. Le rendement-moteur est ainsi plus élevé et la consommation moindre (c'est le cas de la voiture Prius, produite par Toyota). Les cycles de charge et décharge de la batterie sont ainsi très fréquents. La rapidité d'accumulation et de restitution de l'énergie électrique est aussi un facteur clef de la performance. Peu d'énergie spécifique est nécessaire.

Aujourd'hui, toutes les batteries des véhicules hybrides reposent sur la technologie nickel-hydrure métallique (Ni-MH). Mais celle-ci devrait être abandonnée dans le cas des véhicules les plus lourds, sa densité énergétique étant trop faible. Aujourd'hui, BMW et Mercedes commercialisent des véhicules hybrides équipés de batteries au lithium.

Les batteries des véhicules hybrides ne nécessiteront que quelques centaines de grammes de lithium. Mais l'impact de ce type de motorisation sur la réduction de la consommation des énergies fossiles reste faible, car l'énergie stockée par le véhicule provient essentiellement du carburant. Seule leur moindre consommation – de l'ordre de – 20 % – confère aux véhicules hybrides un intérêt environnemental, par rapport aux véhicules thermiques classiques.

#### Les batteries pour véhicule tout électrique (EV)

Le véhicule électrique fonctionne uniquement grâce à l'électricité stockée dans un pack de batteries.

Les véhicules tout électriques nécessiteront davantage d'énergie spécifique leur assurant une importante autonomie (dépassant les 200 km). En revanche, les conditions de charge électrique des batteries de ces véhicules sont moins contraignantes. Le rechargement de la batterie s'opère, de façon contrôlée, en quelques heures.

La technologie des batteries au lithium sera retenue pour les véhicules tout électriques, auxquels elle confèrera une autonomie bien supérieure.

Plusieurs kilogrammes de lithium seront nécessaires dans les voitures tout électriques : jusqu'à 15 kg, pour les batte-

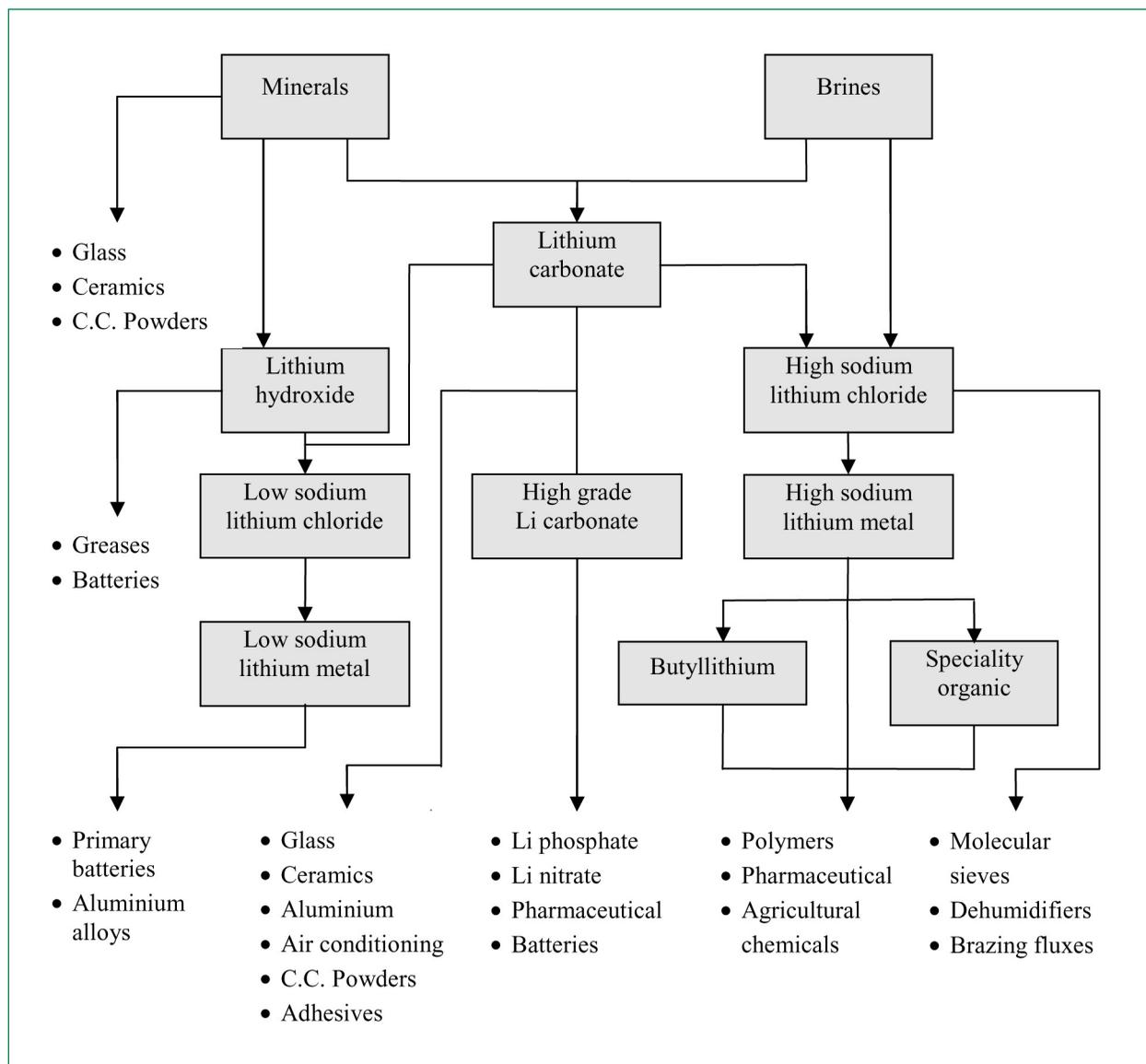


Figure 4 : Schéma général de l'extraction du lithium.

Source : Adapted from SQM.

ries de type Lithium Métal Polymère, dont l'anode est en lithium.

L'impact environnemental peut être très séduisant : le rendement d'un moteur électrique est bien meilleur que celui d'un moteur thermique et le véhicule électrique aura un impact direct sur la réduction de la consommation des énergies fossiles, si l'électricité provient de sources hydraulique, solaire, éolienne ou nucléaire.

En tout état de cause le bilan carbone global de ces véhicules devrait être favorable.

#### Le véhicule Plug-in Hybrid (PHEV)

Le *Plug-in Hybrid Vehicle* permet à son utilisateur de rejoindre les grands axes routiers grâce à la propulsion électrique. Le moteur thermique prend alors le relais sur les voies principales interurbaines. Le PHEV peut recharger sa batterie à partir d'une prise électrique et lors des phases de freinage et de roulage. Le PHEV a été conçu aux Etats-Unis pour lutter contre la pollution urbaine.

Il se caractérise par un compromis entre les besoins énergétiques des deux types de véhicules précédemment décrits (avec une autonomie de 50 km). Son développement nécessitera des quantités de lithium intermédiaires.

#### La concurrence de la pile à combustible

Rappelons tout d'abord le principe de la pile à combustible ; il s'agit de récupérer l'énergie électrique produite par la synthèse électrochimique de l'eau à partir d'hydrogène, d'un côté, et d'oxygène, de l'autre. Son développement se heurte à un certain nombre de défis techniques.

Tout d'abord, le réservoir de stockage de l'hydrogène est un des points d'achoppement technique. Il s'agit de contenir de l'hydrogène liquide sous haute pression (20 bars !). Or, l'hydrogène est une petite molécule instable. La sécurité du dispositif de stockage de l'hydrogène est un point particulièrement sensible.

✓ La synthèse de l'eau s'accompagne d'un dégagement de chaleur notamment en raison de la chute ohmique lors

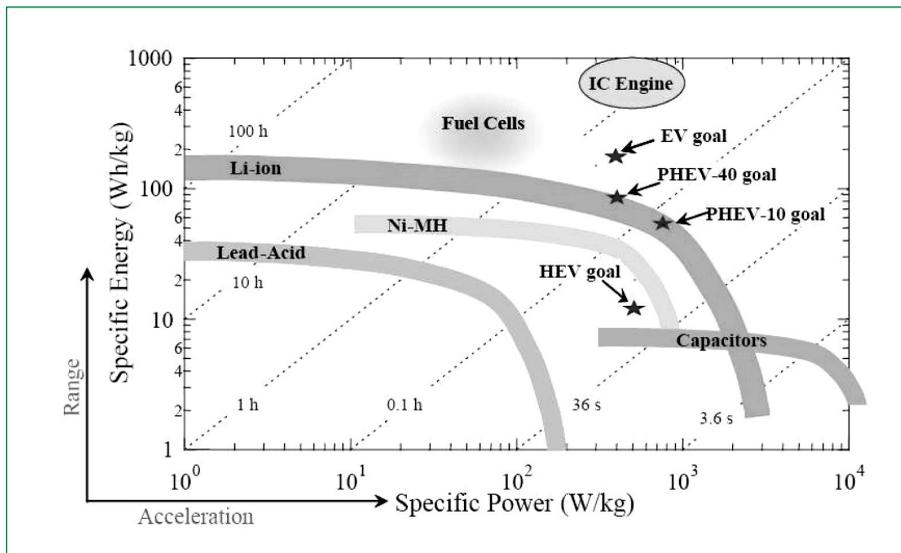


Figure 5 : Performances comparées de divers systèmes de stockage électrochimique de l'énergie.

Source : Product Data Sheets.

du passage de l'hydrogène dans les membranes constitutives des piles à combustible. La chaleur émise doit être évacuée à l'aide de « radiateurs », dont les surfaces d'échanges sont peu compatibles avec les exigences actuelles des concepteurs des véhicules électriques. Des piles pouvant fonctionner à plus hautes températures devront être très certainement conçues.

- ✓ Le rendement du cycle thermodynamique est de l'ordre de seulement 30 %, soit l'équivalent de celui d'un moteur thermique. Pour l'augmenter, la chaleur de la réaction devra être récupérée et transformée en énergie propulsive.
- ✓ Les matériaux utilisés dans la fabrication des membranes sont complexes. Les électrodes, par exemple, sont constituées d'alliages de platine. Les coûts de tels matériaux sont prohibitifs. L'industrialisation de la pile à combustible passera par le développement de matériaux moins chers.
- ✓ La pile à combustible nécessitera le développement d'un réseau de stations services dans lesquelles l'hydrogène devra être produit. Le seul procédé éprouvé aujourd'hui (au Japon, notamment) est celui consistant à produire de l'hydrogène à partir de méthane, qui est un hydrocarbure. Pour ces différentes raisons, la pile à combustible est plutôt présentée comme la génération suivante des technologies de production d'énergie électrique, qui succédera à la pile au lithium. Le lithium ne disparaîtra pas tout à fait : des batteries performantes devront être associées aux piles à combustible car une certaine quantité d'énergie devra être stockée, puis restituée lors des phases d'accélération du véhicule (régimes transitoires).

### L'évolution du marché à moyen terme

Les deux principaux relais de croissance du marché seront les batteries des systèmes embarqués et les batteries de véhicules électriques.

#### Les batteries portables

Le taux de pénétration des téléphones et des ordinateurs portables continuera d'augmenter.

Les exigences techniques des équipements portables (mobiles de génération 3G, baladeurs MP3 ou autres smartphones, tels que l'i-Phone et le Black Berry) nécessiteront des batteries d'une puissance et d'une autonomie supérieures.

Une croissance annuelle de 5 à 10 %, une fois la crise amortie, se traduirait par une demande supplémentaire de 2 500 à 4 500 tonnes/an des batteries destinées à ces applications en 2020.

#### Les véhicules électriques

Le marché du lithium pourrait évoluer de façon encore plus sensible grâce au développement de la voiture électrique.

En mai 2008, Toyota déclarait qu'il s'était fixé comme objectif de vendre annuellement 1 million de véhicules hybrides au début des années 2010 et de proposer une version hybride de chacun de ses modèles actuels, en 2020.

En août 2009, Carlos Ghosn (Renault) renchérisait, en lançant le véhicule électrique Leaf : « [...] Nous voyons les voitures électriques non comme un marché de niche, mais comme un marché de masse » [qui pèsera] « plus de 5 % des ventes mondiales ».

Les études des cabinets de conseil en stratégie tels que Yano, Goldman Sachs et Boston Consulting Group prévoient des taux de pénétration du marché de l'OCDE relativement « modestes » : de 8 % à 36 %, en 2020. Les avis divergent sur les répartitions futures des divers types de véhicules électriques, avec, toutefois, une large prédominance du déploiement des véhicules hybrides (cf. le tableau 2).

La consommation annuelle supplémentaire estimée serait comprise, en 2020, entre + 4 500 tonnes et + 45 000 tonnes de lithium contenu (L'hétérogénéité de ces chiffres, qui varie d'un facteur 10, peut surprendre !).

En résumé, les prévisions les plus optimistes prévoient le doublement, voire le triplement du marché du lithium en 2020.

Assisterons-nous donc à une explosion de la demande, ou bien devons-nous nous attendre à une croissance régulière et stable, telle que nous l'avons connue depuis les dix dernières années ? Il est bien difficile de trancher...

Horizon 2020	Type de véhicule	EV	PHEV	HEV	
	kg Li /véhicule	3,5	1,75	0,25	
Projections Yano	Répartition du segment (en %)	5 %	13 %	81 %	100 %
	Répartition du segment (en milliers de véhicules)	401	1 030	6 269	7 700
	Besoin en lithium (tonnes)	1 404	1 803	1 567	4 774
Projections Goldman Sachs	Répartition du segment (en %)	13 %	24 %	63 %	100 %
	Répartition du segment (en milliers de véhicules)	1 534	2 832	7 434	11 800
	Besoin en lithium (tonnes)	5 369	4 956	1 859	12 184
Projections Boston Consulting Group	Répartition du segment (en %)	27 %	17 %	56 %	100 %
	Répartition du segment (en milliers de véhicules)	8 748	5 508	18 144	32 400
	Besoin en lithium (tonnes)	30 618	9 639	4 536	44 793

Tableau 2 : Besoin en lithium à l'horizon 2020.

## Perspectives de la production et des ressources en lithium

### Projets d'expansion et « green field »

Quelques projets d'expansion sont étudiés par les producteurs actuels.

- ✓ Au Chili, des capacités supplémentaires, de près de 5 000 tonnes/an, sont envisagées ;
- ✓ En Chine, une montée en production complémentaire de 12 000 tonnes/an serait planifiée ;
- ✓ En Australie, un projet de 3 500 t/an est en cours de construction.

A plus long terme, de nombreux projets « *green fields* » sont à l'étude : en Bolivie, sur le Salar d'Uyuni, en Argentine et au Chili sur des salars de tailles moyennes, au Canada, aux Etats-Unis (Nevada, Californie), au Chili, en Europe (en Finlande). Ces projets, s'ils étaient tous réalisés, se traduiraient par une offre supplémentaire annuelle de plus de 20 000 tonnes de lithium.

### Les innovations technologiques

Si la ressource en lithium est abondante, il faudra néanmoins mettre au point de nouveaux procédés d'extraction de celui-ci, afin de le transformer en métal.

Les compositions chimiques des saumures des déserts de sel en Argentine sont moins favorables que celle du salar d'Atacama ; les taux de sulfates y sont, en général, plus élevés.

Les saumures des salars chinois de la province de Qinghai et du Tibet se caractérisent par des teneurs préjudiciables en magnésium.

Les sulfates, de même que le magnésium, piègent le lithium dans des sels doubles lors de la cristallisation par évaporation solaire ; le rendement du procédé devient alors trop faible.

Autre facteur défavorable : les conditions météorologiques. En effet, sur l'altiplano argentin, à plus haute altitude que le salar d'Atacama, et *a fortiori* sur les plateaux tibétains et ceux de la province du Qinghai, le taux d'humidité

est plus important et les températures plus basses, ce qui induit un taux d'évaporation bien plus faible.

De nouveaux procédés devront être développés pour séparer le lithium du magnésium et des sulfates, dans des conditions climatiques moins propices à l'évaporation solaire.

Des essais d'extraction sur des formes minérales lithifères plus altérées (argile de type hectorite) sont réalisés aux Etats-Unis. Certains envisagent même de produire du lithium à partir des eaux géothermales, en utilisant des procédés membranaires (osmose inverse).

### Le recyclage du lithium

Aujourd'hui, le lithium n'est pas recyclé. L'obligation législative (au niveau européen, tout au moins) faite aux fabricants de véhicules de recycler le lithium contenu dans les batteries permettrait de prolonger sensiblement l'accès à la ressource lithifère naturelle.

### La Bolivie et la Chine

Même dans les hypothèses les plus optimistes et malgré les incertitudes quant à l'évaluation des réserves, on peut raisonnablement penser que les ressources en lithium suffiront largement à couvrir les besoins du marché durant le siècle à venir.

Le développement d'au moins deux ou trois projets importants est nécessaire, mais aucun acteur potentiel n'est indispensable, y compris la Bolivie ou la Chine : il y aura assez de lithium si d'autres sources sont développées ailleurs (voir la photo de la page suivante).

## Conclusion

Pour que le lithium devienne un élément de solution dans la lutte contre l'émission des gaz à effet de serre, certaines conditions doivent être réunies :

- ✓ L'adoption des batteries au lithium pour les véhicules automobiles dépendra de l'aptitude des consommateurs à modifier leurs habitudes. Le véhicule tout électrique restera un véhicule urbain de petite taille et d'une autonomie réduite à 200 kilomètres ;

**Photo :** Le salar d'Uyuni (Bolivie).

Source : © ERAMET.



- ✓ Des incitations administratives ou financières pour compenser le coût plus élevé des voitures électriques par rapport aux véhicules thermiques (dont les performances énergétiques ne cesseront de s'améliorer) ;
- ✓ Les pouvoirs publics devront aussi favoriser le développement des infrastructures *ad hoc* : réseaux de prises électriques et circuits de distribution et de collecte des batteries et, bien sûr, des centres de production d'électricité à partir d'énergie non fossile ;
- ✓ Une cellule lithium ion possède une énergie de combustion se situant entre 1 000 et 2 000 Wh/kg et sa température d'ignition est de 100° C. Toute mauvaise utilisation de la batterie (surchauffe ou surcharge) peut être à l'origine d'un feu très violent. Ce point sensible doit être sérieusement appréhendé soit par la mise en œuvre de systèmes de régulation de température éprouvés ou, bien encore, par l'adoption de technologies de batterie qui repoussent significativement la température d'ignition (de type lithium métal polymère, par exemple). Tout accident grave pourrait en

effet affecter durablement le développement des véhicules électriques.

Cependant, nous pouvons être optimistes en ce qui concerne le développement du lithium, notamment en raison :

- ✓ de l'abondance des ressources et des nombreux projets de construction de nouvelles capacités ;
  - ✓ du fait que le lithium est un élément de réponse au problème géopolitique et économique de la dépendance envers le pétrole, tout au moins en ce qui concerne les véhicules électriques terrestres de transport de personnes.
- Le lithium ne sera pas un nouvel Eldorado, qui remplacerait celui du pétrole. Il restera un marché de niche. La taille de son marché restera modeste : environ 1 milliard de dollars/an en 2020, soit l'équivalent de quelques heures de transactions pétrolières.

#### Note

\* Chef de Projet Lithium, ERAMET.

## Les terres rares, des matières premières minérales stratégiques

Avec 20 % des parts de marché, Rhodia est le leader mondial des produits de formulation à base de terres rares. Alors que la Chine, qui assure 95 % de la production de terres rares dans le monde, limite de plus en plus ses exportations, Rhodia est le seul acteur de son marché à s'approvisionner à la fois en Chine et en dehors de la Chine. Forts de cette expérience unique, Jean-Pierre Clamadieu et Emmanuel Butstraen nous livrent ci-après un éclairage complet sur ces métaux non-ferreux stratégiques.

par Jean-Pierre CLAMADIEU\* et Emmanuel BUTSTRAEN\*\*

### Encadré 1

#### Jean-Pierre Clamadieu\* répond à quelques questions

##### **A quand l'implication de Rhodia dans le domaine des terres rares remonte-t-elle ?**

Jean-Pierre Clamadieu : Nous avons démarré dans les années 1950, à La Rochelle, avec l'industrialisation du procédé d'extraction liquide-liquide permettant de purifier les minerais de terres rares. Puis, progressivement, nous avons investi le terrain de la formulation en misant fortement sur la Recherche & Développement dans cette branche de la chimie. Aujourd'hui, nous sommes le leader mondial des formulations à base de terres rares.

##### **A ce propos, quelles sont les innovations les plus emblématiques de Rhodia dans ce domaine ?**

Jean-Pierre Clamadieu : Rhodia s'est très vite distingué dans le domaine de la catalyse automobile dont il détient aujourd'hui 40 % de parts de marché mondial. Nous avons par ailleurs opéré une véritable rupture en développant la technologie Eolys pour filtres à particules qui équipe désormais plus de 4 millions de véhicules diesel dans le monde. On retrouve également nos formulations dans d'autres produits de la vie quotidienne. Par exemple, un quart des lampes à basse consommation ou la moitié des écrans plats intègrent nos innovations à bases de terres rares.

##### **Vous avez misé très tôt sur la Chine (et l'histoire vous donne raison)... ?**

Jean-Pierre Clamadieu : Nous avons, en effet, été des précurseurs, lorsque nous avons installé une première usine en Mongolie intérieure (en 1996), puis une deuxième, dans le Jiangsu (en 2001). A l'origine, cette décision était motivée par la proximité des mines de terres rares. Mais, aujourd'hui, les enjeux sont plus larges : cette implantation de longue date nous permet à la fois d'avoir une assise solide dans le pays, des relations de confiance avec les autorités et d'être en bonne position pour tirer parti d'une demande locale en plein essor.

### Les terres rares : ces « vitamines » indispensables aux nouvelles technologies

Utilisées en faible quantité dans de nombreuses applications, les terres rares sont les « vitamines » indispensables au développement des nouvelles technologies et, en particulier, des technologies « vertes ». En dépit de leur nom, elles ne sont pas plus rares que le cuivre ou le plomb, mais leur faible concentration dans leurs minerais ne rend pas toujours leur extraction économiquement viable.

Comme pour d'autres matières premières, la Chine a établi un monopole de fait sur la production de terres rares. Combiné à des mesures (récemment renforcées) de restric-

tion des exportations, ce monopole est utilisé par les autorités chinoises afin d'attirer sur le territoire chinois les technologies nécessaires à la production de terres rares à forte valeur ajoutée.

Etant donné le caractère incontournable des terres rares dans de nombreuses applications, l'enjeu, pour les années à venir, est le développement de gisements hors de Chine, afin de compléter la production mondiale actuelle et de sécuriser un approvisionnement en terres rares indispensable à l'industrie. Il s'agit là d'un enjeu immense, dont la compréhension nécessite des éclaircissements sur les propriétés, l'exploitation et les applications de ces éléments chimiques qui se retrouvent depuis peu au cœur de l'actualité.

**Encadré 2****Trois questions à Emmanuel Butstraen\*\*****1) Quelles sont vos compétences dans le domaine des terres rares ?**

Emmanuel Butstraen : Notre savoir-faire se situe dans la recherche et le développement de formulations à base de terres rares. Nous avons également des compétences dans les procédés industriels nécessaires à la séparation des différents éléments composant le minerai. Une fois ces éléments séparés, nous en faisons des formulations de haute technologie qui serviront d'additifs indispensables pour la dépollution automobile, ou de précurseurs de luminophores pour les ampoules à basse consommation, ou encore de polisseurs de haute précision pour la fabrication des écrans plats, des lecteurs MP3 et de microprocesseurs.

**2) La politique des quotas que met en œuvre la Chine a-t-elle un impact sur votre stratégie ?**

Emmanuel Butstraen : Cette politique chinoise n'est pas nouvelle, mais elle s'est renforcée ces dernières années et nous nous y sommes adaptés. Pour nous, l'enjeu consiste avant tout à diversifier nos approvisionnements et nous étudions de près les projets miniers nous concernant en dehors de Chine. Nous avons ainsi signé, au mois de janvier de cette année (2010), un accord avec la société australienne Lynas, qui exploitera (à partir de 2011) une importante mine de terres rares à Mount Weld, dans l'Ouest de l'Australie.

**3) En quoi cet accord est-il essentiel pour vous ?**

Emmanuel Butstraen : Lynas apportera, à terme, plus de 20 000 tonnes de terres rares supplémentaires sur le marché et une partie de sa production nous sera réservée. Cette alternative aux terres rares chinoises est un premier pas pour sécuriser nos approvisionnements et nous pourrions conclure d'autres contrats de ce type à l'avenir. Tout l'intérêt pour nous, c'est d'être présents à la fois en Chine et en dehors de la Chine.

**Les terres rares : des éléments pas si rares que cela, mais très spécifiques...**

Les terres rares constituent un ensemble de 16 éléments chimiques : 14 lanthanides, auxquels s'ajoutent l'yttrium et le scandium, qui présentent des propriétés chimiques similaires. Il existe, en théorie, un quinzième lanthanide, mais celui-ci n'est pas stable dans des conditions naturelles (cf. la figure 1).

Ces éléments ont conservé le nom ancien de « terres » autrefois donné par les chimistes aux oxydes (des mélanges de l'élément oxygène à un autre élément donné), car c'était là la forme sous laquelle les premiers chimistes les avaient identifiés.

La particularité de ces éléments, ainsi que celle de leurs applications, réside dans leur structure électronique. Dans le tableau périodique des Mendeleïev, qui classe les éléments chimiques en fonction de leur configuration électronique, les 14 lanthanides n'occupent, en réalité, qu'une seule case : en effet, leur structure électronique est identique (5d16s2), en ce qui concerne leurs couches externes d'électrons, ce qui leur confère des propriétés chimiques très proches. En revanche, on peut classer ces 14 éléments en une liste constituée de telle sorte que chaque élément diffère du précédent en ceci qu'il possède un électron supplémentaire dans sa couche profonde d'électrons (4f). Il s'agit là d'une propriété tout à fait spécifique à ces éléments : cette pro-

Rare Earth Elements														Y			
La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	39		
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71			
Lanthanides																	
H														He			
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	An	Lr														

Figure 1 : Les seize éléments composant le groupe des terres rares.

priété est à l'origine du caractère irremplaçable des terres rares dans nombre de leurs applications. Ces terres rares ont été subdivisées en deux groupes, du fait de la prédominance, dans chaque minéral, de l'un ou de l'autre de ces groupes. Les terres rares légères (du lanthane au praséodyme), dites aussi terres cériques, sont plus abondantes que les terres rares lourdes (allant du samarium au lutécium), appelées également terres yttriques.

Bien que très particuliers, ces éléments ne sont pas réellement « rares ». Le cérium, qui est le plus répandu, est en effet plus abondant que le cuivre, et même le plus rare, le lutécium (environ cent fois moins abondant que le cérium), se trouve à la surface de la terre en plus grande quantité que l'argent (1). Les réserves mondiales de terres rares sont ainsi estimées à 88 millions de tonnes par l'*US Geological Survey*. Ces éléments ont pourtant été qualifiés de rares du fait de leur très faible concentration dans les gisements. La concentration en terre rare du gisement présent dans l'Ouest australien, par exemple, considérée comme élevée, est de 5 % seulement (2). Les gisements de terres rares, forts nombreux, contiennent dans la plupart des cas plusieurs minéraux. La bastnaésite est le minéral de terres rares historiquement le plus exploité aux Etats-Unis, ainsi, depuis peu, qu'en Chine, où il est associé à du minéral de fer dans le gisement de Bayan Obo (en Mongolie intérieure). La monazite, seconde source de terres rares, contient quant à elle de grandes proportions de thorium. On en trouve en Chine, aux Etats-Unis, en Australie, au Brésil, en Inde, en Malaisie, en Afrique du Sud, au Sri Lanka ou encore en Thaïlande. Dans chacun de ces minerais, les quatorze lanthanides (ainsi que le scandium et l'yttrium) sont mêlés, mais dans des proportions différentes.

Chacune des terres rares, telles qu'elles sont utilisées dans l'industrie, n'existe donc pas sous une forme pure à l'état naturel. Elles sont purifiées après extraction des minerais de terres rares grâce à un certain nombre de traitements tant physiques que chimiques. Une première étape consiste à concentrer le minéral grâce à des procédés physiques (flottation, enrichissement magnétique, gravimétrie) afin d'obtenir un concentré contenant (selon

le minéral) de 30 à 70 % de terres rares. Ce concentré est ensuite attaqué (dissout) par un procédé chimique (utilisant des acides ou des bases fortes), ce qui permet d'isoler les terres rares en mélange du reste du minéral. Ensuite, la purification, opérée industriellement grâce à la technique d'extraction liquide-liquide, consiste à isoler les terres rares (encore mélangées) les unes des autres (cf. le tableau 1).

### La Chine assure 95 % de la production mondiale des terres rares

Dans les années 1950, l'Inde et le Brésil ont été les premiers pays à exploiter la monazite, un minéral de terres rares, dont la production annuelle atteignait quelques milliers de tonnes. Les Etats-Unis, grâce à leurs gisements de bastnaésite de Mountain Pass (en Californie), ont ensuite dominé la production mondiale, avec 20 000 tonnes (3) produites annuellement, dans les années 1980. Les mines ont toutefois été fermées au milieu des années 1980 pour des raisons environnementales. La Chine est alors devenue le principal producteur et a fait croître très rapidement sa production. Actuellement, bien qu'elle ne possède qu'un tiers des réserves mondiales, la Chine produit plus de 95 % des terres rares utilisées dans le monde, soit 120 000 tonnes en 2008 sur une production mondiale de 124 000 tonnes (4) (cf. la figure 2).

Cette production chinoise provient essentiellement de trois régions. Il s'agit de l'exploitation de minerais de bastnaésite au Sichuan, et principalement en Mongolie Intérieure, dans la région de Baotou. Ce minéral, qui est un sous-produit de l'exploitation du minéral de fer de la mine de Bayan Obo, est actuellement la principale source de terres rares légères dans le monde. Le Sud de la Chine (provinces de JiangXi et de Guangdong (Canton)) recèle quant à lui des gisements d'argiles ioniques uniques au monde : les terres rares lourdes telles que le terbium, l'europtium et le dysprosium, mais aussi l'yttrium, y ont été concentrées par l'érosion géologique et présentent une répartition et une accessibilité uniques au monde.

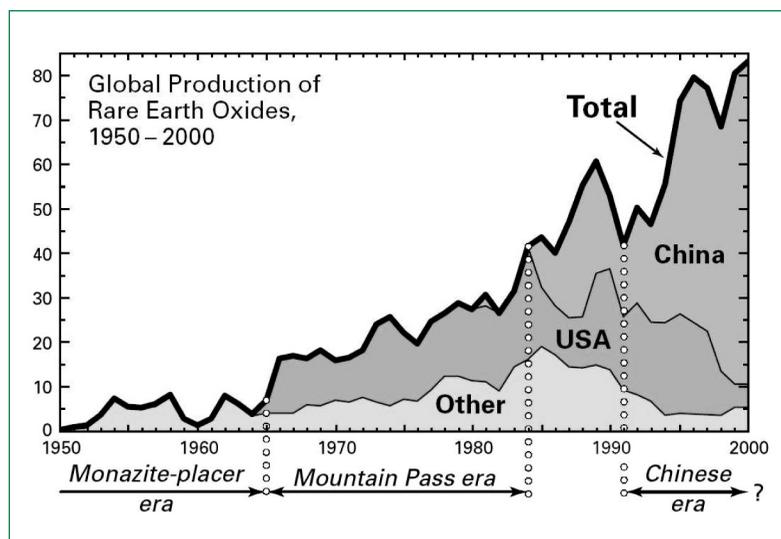


Figure 2 : Production mondiale d'oxydes de terres rares (en kt) sur la période 1950-2000.

La production totale a été répartie en 3 catégories : les Etats-Unis, pour l'essentiel, à partir du gisement de Mountain Pass (Californie) ; la Chine, à partir de plusieurs gisements ; le reste du monde, principalement à partir de gisements sous forme de monazite. Quatre périodes de production peuvent être distinguées : la période des gisements sous forme de monazite, commençant à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle pour se terminer brutalement en 1964 ; la période du gisement de Mountain Pass, débutant en 1965 et se terminant aux alentours de 1984 ; une période de transition entre 1984 et 1991 ; enfin, la période chinoise depuis 1991.

Source : « Rare Earth Elements – Critical Resources for High Technology », Gordon B. Haxel et al., U.S. Geological Survey, November 2002.

Élément	Nombre d'atomes	Symbole	Masse atomique (gr)	Oxyde	Couleur	Abondance estimée dans la croûte terrestre (ppm)
Lanthane	57	La	138,91	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Blanc ou sans couleur	18
Cérium	58	Ce	140,12	- CeO <sub>2</sub>	Blanc ou sans couleur Jaune	46
Praséodyme	59	Pr	140,91	- Pr <sub>6</sub> O <sub>11</sub>	Vert Noir (oxyde)	5,5
Néodyme	60	Nd	144,24	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Bleu-violet	24
Prométhium	61	Pm	146,00	Pm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rose	-
Samarium	62	Sm	150,43	- Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rouge	6,5
Europium	63	Eu	152,00	- Eu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Crème Sans couleur	0,5
Gadolinium	64	Gd	157,25	Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Blanc ou sans couleur	0,9
Terbium	65	Tb	158,93	- Tb <sub>4</sub> O <sub>7</sub>	Blanc ou sans couleur Marron (oxyde)	5,0
Dysprosium	66	Dy	162,46	Dy <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Crème	1,2
Holmium	67	Ho	164,93	Ho <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Crème	4,0
Erbium	68	Er	167,26	Er <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Rose	0,4
Thulium	69	Tm	169,93	Th <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Vert	2,7
Ytterbium	70	Yb	173,04	- Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Vert Sans couleur	0,8
Lutétium	71	Lu	174,97	Lu <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Sans couleur	10,0
Yttrium	39	Yt	88,91	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Blanc	28,0

**Tableau 1** : Les propriétés des différentes terres rares.

Source : Kirk-Othmer, *Encyclopaedia of Chemical Technology*, Interscience Publishers, New York.

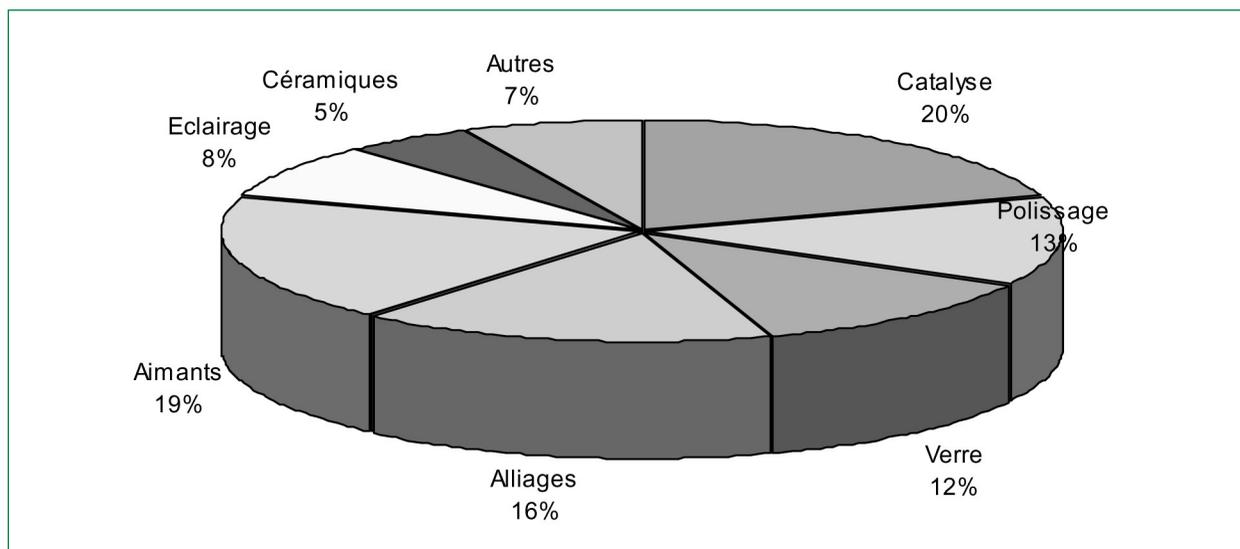
### De l'iPod aux voitures électriques... : les terres rares sont partout

Surnommées à juste titre les « vitamines de l'industrie » par les Japonais, les terres rares trouvent des applications extrêmement variées : présentes à la fois dans des objets d'un usage quotidien et dans les matériels militaires, elles sont également nécessaires à plusieurs procédés de fabrication industriels. Par ailleurs, sans elles, il serait impossible de mettre au point nombre de technologies « vertes » (cf. la figure 3).

L'un des principaux usages des terres rares, qui repose sur leurs propriétés magnétiques, consiste en la fabrication d'aimants utilisés dans les moteurs de l'industrie électronique et automobile, ainsi que dans de nombreux systèmes de stockage de données (c'est par exemple le cas de ceux que l'on trouve dans les iPods). Plus de 20 000 tonnes de terres rares, soit 20 % de la production mondiale (5), ont été ainsi utilisées en 2006. Les alliages samarium-cobalt, apparus et utilisés dans les années 1970, ont été progressivement remplacés par des alliages néodyme-fer-bore, mis au

point à la fin des années 1980. Le rapport entre la puissance, la petite taille et la légèreté des aimants ainsi obtenus a constitué le corollaire indispensable de la miniaturisation des technologies. Dans le cas des voitures hybrides ou tout électriques, cet atout est irremplaçable : pour une puissance équivalente, un noyau d'électro-aimant en fer alourdirait considérablement le véhicule, réduisant d'autant l'autonomie des batteries.

Les batteries représentent elles-mêmes la seconde application, dans l'ordre d'importance, des terres rares : 16 % de la production mondiale, soit environ 17 000 tonnes (6), ont été destinées en 2006 à la composition d'alliages de métaux pour les batteries de téléphones ou de voitures électriques. Les batteries en nickel-métal hydride, dont la technologie est éprouvée, sont une alternative particulièrement opportune aux batteries en nickel-cadmium. Ces dernières, très toxiques, sont interdites par l'Union européenne depuis 2006 dans les appareils électroniques. La Toyota Prius et la Honda Civic IMA, les deux modèles d'automobiles hybrides les plus vendus actuellement, sont toutes deux équipées d'une batterie contenant des terres rares.



**Figure 3** : Répartition des terres rares sur les marchés finaux.  
Source : Rapport Roskill, Novembre 2007.

Celles-ci entrent également dans la composition des pots catalytiques utilisés dans l'industrie automobile, avec plus de 8 000 tonnes de terres rares consommées à cette fin en 2006, soit 7 % de la production mondiale. Les normes de réglementation des émissions des moteurs thermiques ont, dès les années 1980 aux États-Unis, imposé des réductions très sensibles des émissions de gaz nocifs. Or, les formules à base de cérium constituent un élément irremplaçable de ces pots catalytiques : il permet à ceux-ci de transformer les oxydes d'azote, le monoxyde de carbone et les hydrocarbures non-brûlés en azote, en dioxyde de carbone et en eau. Cette terre rare est donc absolument indispensable au respect des normes réglementaires. Dans le domaine de la dépollution des moteurs diesel, les terres rares ont également été les vecteurs de progrès significatifs. Rhodia a ainsi développé le catalyseur soluble Eolys™ pour filtres à particules. Utilisé en particulier par PSA, ce procédé permet une régénération rapide et complète du filtre, éliminant ainsi plus de 99 % des particules émises. Aujourd'hui, plus de quatre millions de véhicules sont équipés de cette technologie. Enfin, les terres rares sont également utilisées dans la recherche de solutions de dépollution adaptées aux nouvelles motorisations diesel ou aux nouveaux biocarburants, telles qu'elles seront exigées par la norme Euro 6, applicable à compter de 2014.

De nombreuses applications sont, par ailleurs, dérivées des propriétés optiques des terres rares. Certaines terres rares lourdes entrent, en effet, dans la composition de luminophores : sous l'excitation de photons UV, les luminophores à base d'euporium émettent ainsi une lumière rouge, ceux à base de terbium génèrent une lumière verte, et les luminophores à base d'euporium, à un degré d'oxydation différent, produisent une lumière bleue. Les lampes à basse consommation (ou lampes trichromatiques) en sont une des principales applications. Une couche de ces trois luminophores à base de terres rares est déposée sur la face interne de l'ampoule, l'ensemble permettant d'obtenir une émis-

sion lumineuse blanche. A consommation d'énergie équivalente, l'émission lumineuse de ces lampes est cinq fois plus intense que celles des ampoules traditionnelles. Suite à la directive européenne de 2009 programmant l'interdiction progressive de la fabrication de lampes à incandescence, celles-ci seront progressivement retirées du marché au profit des ampoules basse consommation. Les terres rares sont donc indispensables à l'application de cette directive européenne favorisant les économies d'énergie.

De la même manière que pour les ampoules trichromatiques, les terres rares sont utilisées dans les écrans plats à cristaux liquides (LCD) : le rétro-éclairage de ces écrans, qui permet d'illuminer les cristaux liquides, est assuré par des luminophores à base de terres rares. Dans les écrans plasma, les propriétés optiques des terres rares sont utilisées différemment : les pixels sont eux-mêmes constitués de terres rares. Chacun des pixels est en effet composé des trois types de luminophores produisant les trois couleurs fondamentales, que sont le rouge, le bleu et le vert. Ces usages sous forme de luminophores ont engendré, en 2006, une consommation de 8 500 tonnes de terres rares, soit 8 % de la production mondiale.

D'autres types de propriétés optiques sont également très utilisés dans l'industrie du verre, qui a consommé, en 2006, près de 13 000 tonnes de terres rares, soit plus de 10 % de la production mondiale (7). Les lentilles optiques de haute qualité, les appareils photos numériques, les fibres optiques, tous ces produits contiennent du verre enrichi en terres rares, seules capables de leur conférer les propriétés désirées, telles qu'un indice de réfraction élevé, une faible dispersion de la lumière ou encore la filtration des rayons ultra-violet. Tous ces usages trouvent des déclinaisons dans le matériel militaire et médical, renforçant ainsi le caractère stratégique des terres rares.

Indispensables dans une très grande quantité de matériels, les terres rares servent également dans un certain nombre de procédés industriels. Leur utilisation dans les

procédés de polissage de haute précision est la plus importante. Les propriétés chimiques, voisines du verre et de l'oxyde de cérium, permettent d'obtenir, par abrasion mécanique et chimique, des surfaces extrêmement lisses. Les terres rares sont actuellement utilisées pour le polissage des disques miniatures en verre présent dans les iPods et dans tous les nouveaux lecteurs MP4, ou encore pour polir les écrans à cristaux liquides (LCD) et les tranches de silicium destinées aux panneaux photovoltaïques. Les procédés de fabrication des microprocesseurs de nouvelle génération nécessitent de plus en plus un polissage de haute précision, que seules permettent les terres rares.

Les terres rares sont, par ailleurs, présentes dans l'industrie pétrolière : leurs propriétés sont en effet indispensables dans le processus de raffinage du pétrole brut, car elles sont utilisées comme dopants permettant le bon fonctionnement des catalyseurs de *cracking* catalytique du pétrole brut. En 2006, cette application dans la grande industrie a nécessité plus de 13 000 tonnes de terres rares, soit 12 % de la production mondiale (8). A l'heure actuelle, il n'existe aucune solution alternative.

La valeur des transactions sur ces métaux particuliers a atteint 1,25 milliards de dollars en 2008, pour une quantité de 124 000 tonnes. Ce montant est relativement faible, en comparaison de la taille de l'industrie et des marchés qui dépendent de ces terres rares, représentant plusieurs centaines de milliards de dollars. Du fait de l'expansion de ces technologies et de ces marchés, la demande mondiale en terres rares s'accroît, elle aussi.

### **La politique chinoise : moins d'exportations, plus de valeur ajoutée**

Cette croissance de la demande mondiale en terres rares pourrait toutefois se heurter à la volonté qu'a la Chine d'en limiter l'extraction sur son sol à la seule utilisation en territoire chinois. Conscient du caractère stratégique de cette ressource et dans sa volonté de gérer durablement ses réserves, le gouvernement chinois a mis en place, dès la fin des années 1990, des politiques visant à mieux en contrôler la production. Il s'agissait de préserver cette ressource limitée et de réduire encore plus les atteintes à l'environnement découlant de son exploitation. En parallèle, ces politiques servent également une logique industrielle à long terme visant à attirer en Chine des applications industrielles à plus forte valeur ajoutée. En d'autres termes, ces politiques visent à permettre à l'industrie chinoise de diminuer les exportations de matières premières à faible valeur ajoutée et d'augmenter celles des matières et produits à forte valeur ajoutée.

La première étape de cette stratégie fut l'appropriation rapide, au début des années 1990, des technologies complexes d'exploitation et de purification des terres rares, jusqu'alors dominées par Rhône-Poulenc et Molycorp. Très rapidement, les Chinois ont construit des capacités industrielles et ils sont devenus les leaders mondiaux des techniques de purification des terres rares.

La deuxième étape a consisté à mettre en place un système de taxes et de quotas à l'exportation. En 2000, les quotas chinois à l'exportation ont été mis en place en invoquant une volonté de préserver la ressource. Les montants des quotas ont ensuite été progressivement réduits chaque année. Mises en difficulté, les entreprises ne possédant pas assez de quotas pour faire face à leurs besoins d'exportations, n'ont pas eu d'autre solution que d'acheter des quotas sur le marché. La politique fiscale a, elle aussi, progressivement limité l'accès des acheteurs étrangers aux terres rares et ce, depuis 2004. Des mesures adoptées en 2004 et en 2006 ont d'abord mis fin au remboursement de la TVA pour les exportations. Puis, entre 2006 et 2008, les taxes à l'exportation ont été introduites, puis augmentées, finissant par atteindre 25 %, pour certaines terres rares. Dès 2008, ces deux mesures combinées engendraient un surcoût pour les acheteurs étrangers allant de 30 à 43 % pour les matières destinées à des usages à forte valeur ajoutée (telles que le terbium ou le dysprosium, utilisés, respectivement, dans les ampoules basse consommation et dans les aimants).

Ces mesures sont ainsi parvenues à limiter les exportations des terres rares sous la forme de matières premières. En revanche, aucune de ces restrictions ne concerne les produits à forte valeur ajoutée fabriqués en Chine et intégrant des terres rares, qui sont exemptés de ces contraintes en termes de quotas ou de fiscalité. Les entreprises étrangères du domaine des terres rares sont, de ce fait, progressivement incitées à investir en Chine afin d'accéder aux matières premières, et à transférer ainsi leurs technologies sur le sol Chinois.

Parallèlement, le gouvernement chinois a signifié sa volonté de concentrer le secteur minier et les entreprises de purification, auparavant très fragmentés, autour de trois grands groupes : *Baotou High Tech* pour l'exploitation de la mine de Bayan Obo en Mongolie intérieure, *China Min Metal* pour les argiles ioniques exploitées dans le JiangXi et le *Guangdong, JiangXi Copper* pour la mine du Sichuan. Cette concentration du secteur se fait au moyen du contrôle de l'exploitation, notamment par l'attribution sélective de licences d'exploitation des mines.

L'année 2009 a laissé entrevoir un renforcement de cette stratégie. Tout d'abord, une rumeur a filtré sur le projet de plan 2009-2015 proposé pour le développement des terres rares, qui prévoyait d'interdire les exportations de dysprosium, de terbium, de lutétium et d'yttrium. Pour l'ensemble des terres rares, le gouvernement chinois proposait de restreindre les ventes à l'étranger des autres éléments du groupe à moins de 35 000 tonnes par an, ce qui représente une diminution de moitié.

La réaction a été immédiate : le Japon a menacé la Chine de recourir à l'Organisation Mondiale du Commerce pour distorsion de concurrence, alors que les Etats-Unis et l'Europe avaient déjà entamé ces procédures au sujet d'autres matières premières. En réponse à ces réactions, Pékin a renoncé à son projet de bloquer les exportations de certaines terres rares, au profit d'un simple contingentement.

Par ailleurs, plusieurs entreprises chinoises cherchent à entrer dans le capital de sociétés minières étrangères impliquées dans l'exploitation de nouveaux gisements de terres rares. Ainsi, en juin 2009, le groupe minier étatique *East China Mineral Exploration & Development Bureau* (ECE) a racheté un quart du capital d'*Arafura Resource*, une entreprise australienne qui sera bientôt active dans l'exploitation de terres rares en Australie. Quelques mois plus tard, le groupe *China Nonferrous Metal Mining Group* a tenté de racheter 52 % du capital de l'Australien *Lynas Corporation*, dont l'exploitation de terres rares démarrera en 2011. Les autorités australiennes ont empêché ce rachat, Lynas restant ainsi une société indépendante.

### La « guerre des terres rares » aura-t-elle lieu ?

A l'horizon 2013, l'offre globale de terres rares, estimée à 140 000 tonnes, ne suffira pas à satisfaire une demande qui explose littéralement. Pour combler cet écart, pouvant aller de 40 à 50 000 tonnes (9), l'ouverture de nouvelles mines se révèle indispensable.

Qu'en est-il des réserves mondiales ? Selon l'*US Geological Survey*, sur les 88 millions de tonnes de réserves exploitables en l'état actuel des technologies, seul un tiers se trouverait en Chine. L'ex-URSS posséderait 22 % des réserves mondiales (10), les Etats-Unis 14 %, et l'Australie 6 %. Les Etats-Unis devraient ré-ouvrir leur mine californienne de Mountain Pass en 2012, mais le projet le plus porteur à ce jour se trouve dans le Grand Ouest Australien.

C'est en effet dans cette région que la société australienne *Lynas Corp.* devrait commencer à exploiter dès 2011 le riche gisement de Mount Weld. La production pourrait s'élever à 20 000 tonnes annuelles (11), ce qui représente environ le tiers du marché mondial hors de Chine. Cette société minière cotée a récemment procédé à une augmentation de capital de 450 millions de dollars australiens, destinés à la réalisation du projet d'exploitation de la mine jusqu'à la production de terres rares purifiées. Ce réel succès montre que si le défi économique est de taille, les investisseurs sont prêts à soutenir l'exploitation de ces nouveaux gisements.

Outre les industriels, la domination chinoise inquiète désormais les politiques, qui se mettent peu à peu en ordre

de bataille pour défendre leurs industriels. L'Union européenne est actuellement en train de dresser une liste des métaux indispensables à son industrie. Le Congrès américain évalue, quant à lui, le risque pesant sur l'approvisionnement des Etats-Unis en terres rares. Et tous s'interrogent sur l'opportunité de créer un stock des minerais les plus rares (de terbium, d'yttrium...), comme l'a fait le Japon.

Il y a fort à parier que la politique restrictive mise en place par les Chinois accélèrera l'émergence de nouveaux projets d'extraction présentant des modèles économiques attractifs et soutenus par des industriels qui, à l'instar de Rhodia, sont prêts à s'engager sur la durée pour diversifier et sécuriser leurs sources d'approvisionnements.

La « guerre des terres rares » aura-t-elle lieu ?

Peut-être. Dans tous les cas, Rhodia est déterminé à renforcer son leadership dans cette filière particulièrement stratégique...

### Notes

\* Président-Directeur Général de Rhodia.

\*\* Superviseur de l'activité « Terres rares ».

(1) Encyclopédie Universalis ; *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 90<sup>e</sup> édition.

(2) Citation de Nick Curtis, PDG de Lynas, dans *Les Echos*, 13.11.2009 : « L'Australien Lynas s'émancipe des capitaux ».

(3) Toutes les quantités sont exprimées en équivalent-oxyde.

(4) Rapport Roskill, novembre 2007.

(5) Ibidem.

(6) Ibidem.

(7) Ibidem.

(8) Ibidem.

(9) Sean Brodrick, Weiss Research.

(10) Le même organisme évalue à un peu moins du double (150 000 tonnes) les réserves qui pourraient être exploitées à plus long terme grâce aux progrès technologiques. Celles-ci sont situées, pour 60 %, en Chine.

(11) Selon Nick Curtis, PDG de Lynas, dans *Les Echos* du 13 novembre 2009, « L'Australien Linas s'émancipe des capitaux ».

## For our English-speaking readers...

### Raw materials

#### Editorial

Bruno Sauvalle

#### General

##### *Fairness and efficiency in the use of natural resources*

Pierre-Noël Giraud

Do we have the right to rapidly deplete conventional petroleum reserves at less than \$20/barrel? Or should we leave oil for future generations? To what extent should we preserve the soil and old-growth forests? What should be the scope of the efforts to be undertaken immediately for lessening climate change? A preliminary to any economic analysis of these questions is the choice of norms for inter- and intra-generational fairness, a choice that can only come out of a political process.

##### *The only sure thing for 2010: Instability*

Philippe Chalmin

Compared with their very low levels in early 2009, the prices of several products doubled during that year and neared, once again, the heights reached in the spring of 2008. From the supply side, 2009 is characterized by producers' efforts to adjust their exportations. But all of that would not have sufficed, save for China, its economic recovery and need for imports.

### Energy

##### *The prospects for the world's petroleum supply*

Bruno Weymuller

When analyzing petroleum resources, we should look not just under but also above the ground. The industrially installed production capacity is a bottleneck that, like a valve, controls the annual flow from oil reserves. We predict, therefore, a plateau rather than a peak in the coming decade.

##### *Petroleum: Price trends*

Denis Babusiaux and Axel Pierru

The Organization of Petroleum-Exporting Countries (OPEC), some political leaders and financiers have mainly attributed the price spike of oil in 2008 – followed by a just as spectacular drop in prices – to the speculative moves made by financial investors on the futures market instead of to market fundamentals.

##### *Natural gas, energy with a future*

Jean-Marie Dauger

Similar to the trend observed over the last thirty years, the production of electricity will likely account for much of the growth in natural gas consumption worldwide, regardless of the region. However transportation, storage and distribution make up, on the average, 70% of the total costs of producing gas.

##### *The new geopolitics around coal*

Sylvie Cornot-Gandolphe

Since early in the first decade of this new century, coal, though heavily criticized for environmental reasons, has come back strong. World consumption increased 48% between 2000 and 2008. Coal now makes up 27% of world energy and 41% of the energy used to generate electricity. We believed that coal was doomed to vanish

because it was deemed to be an obsolete source of energy associated with the industrial revolution. For this reason, this robust, current growth might come as a surprise.

##### *Nuclear raw materials*

Bernard Bigot

Since 1990, the quantity of ore mined annually only represents 50%-60% of the total consumption of uranium by nuclear reactors. The remainder comes from "secondary resources", i.e., previously mined uranium that has been held in storage or already been used but reprocessed for reuse. However the surplus of these resources available for sale has almost been reabsorbed.

##### *Biofuels: What potential for development?*

Nathalie Alazard-Toux

The current production chain of the first generation of biofuels has quite real limits. To overcome them, efforts are being made to develop processes for converting vegetable resources of little worth into fuel. This research focuses both on these resources and on the technology and processes for turning them into fuel.

### Agriculture

##### *How to feed nine billion people without destroying the environment?*

Michel Griffon

Research in agronomics is pursuing several approaches in order to escape from Malthusian constraints. The best-known approach is the quest for a solution by improving seeds through a transfer of genes. Another is to focus on intensively using ecological processes in ecosystems while supplementing them with conventional techniques under condition that the whole solution be environmentally coherent.

##### *Giving priority to an economic approach to the development of African agriculture*

Bernard Bachelier

More than 265 million Africans are hungry, even though the continent to the south of the Sahara potentially represents one of the planet's major reserves of farmlands. But the production of foodstuffs in Africa runs too many risks to attract private investors. Priority must be given to a "probusiness" approach to developing this sector that is not satisfied with eliminating trade barriers and opening the economy. It would seek to improve the profitability of existing establishments.

### Metals

##### *The strategic management of mineral resources by states and mining companies: Toward a development of oligopolies?*

Patrice Christmann and Bruno Martel-Jantin

A major strategic challenge will be to ensure the supply of mineral resources for nine billion human beings in 2050. The mining industry worldwide must cope with an ever growing number of strategic issues and risks, in particular the rising costs of investments and mining operations.

##### *The European initiative on raw materials*

Abraão de Carvalho

In late 2008, the European Commission adopted "The raw materials initiative: Meeting our critical needs for growth and jobs in Europe",

COM(2008) 699. This strategic communication proposes a coherent global approach for dealing with the challenges arising in the field of industrial raw materials.

***Mineral resources, an asset for the development of Africa south of the Sahara?***

Paulo de Sa and Gary McMahon

Are mineral and hydrocarbon resources an asset for developing countries, in particular those lying to the south of the Sahara? This question has been hotly debated for more than fifteen years. This article examines how mineral resources can have positive effects on the development of countries in Africa south of the Sahara.

***Lithium, a strategic metal***

Antoine Gouze

The two major springs for the lithium market's midterm growth are batteries for embedded systems and electric vehicles. Newspapers

have predicted the coming of a "lithium Middle East" in the Altiplano area of the Andes between Bolivia, Argentina and Chile.

***Rare earths, strategic minerals***

Jean-Pierre Clamadieu and Emmanuel Butstraen

Given the inescapable need for rare earths in several applications, an issue in the near future is to develop deposits of these metals outside China in order to meet worldwide needs and secure the supply indispensable for industry.

Issue editors: Pierre-Noël Giraud and Pierre Couveinhes

## An unsere deutschsprachigen Leser...

### Die Rohstoffe

#### Leitartikel

Bruno Sauvalle

#### Allgemeines

##### **Angemessenheit und Effizienz in der Nutzung der natürlichen Ressourcen**

Pierre-Noël Giraud

Haben wir das Recht, die Reserven an herkömmlichem Erdöl zu weniger als 20 Dollar pro Barrel schnell aufzubrechen, oder müssen wir dafür sorgen, dass auch zukünftige Generationen noch über diese Ressource verfügen können? Inwieweit müssen wir die Böden und Urwälder schützen? In welchem Ausmaß sollten wir uns schon jetzt um die Eindämmung des Klimawandels bemühen? Eine notwendige Vorbedingung für jede wirtschaftliche Analyse dieser Fragen: die Entscheidung für inter- und intragenerationelle Normen der Angemessenheit – eine Entscheidung, die nur aus einem politischen Prozess erwachsen kann.

##### **Die einzige Gewissheit für 2010 : die Unstabilität**

Philippe Chalmin

Im Vergleich zu den sehr gedrückten Preisniveaus von Anfang 2009 verdoppelten sich die Preise für sehr viele Produkte im Laufe des Jahres und näherten sich den hohen Werten, die sie im Frühjahr 2008 erreicht hatten. Auf der Angebotsseite war das Jahr 2009 durch die Bemühungen der Produzenten geprägt, ihre Exporte der Lage anzupassen. Aber dies alles hätte nicht ausgereicht, wenn China nicht gewesen wäre, sein wirtschaftlicher Aufschwung und sein Bedarf an Importen.

#### Energie

##### **Die Perspektiven des weltweiten Erdölangebots**

Bruno Weymuller

Die Analyse der Erdölressourcen darf nicht nur *below the ground*, sie muss auch *above the ground* durchgeführt werden. Die industriell installierte Produktionskapazität stellt einen jährlichen Engpass dar, der wie ein Mengenventil auf die Jahresproduktion wirkt, die aus den Reservevorräten an Erdöl hervorgeht. Dies lässt für das kommende Jahrzehnt eher auf ein stabiles hohes Niveau schließen als auf eine Produktionssteigerung.

##### **Die Entwicklungen des Erdölpreises**

Denis Babusiaux und Axel Pierru

Den brutalen Anstieg des Erdölpreises im Jahr 2008, dem ein nicht weniger spektakulärer Preissturz folgte, schrieben die OPEC und gewisse Entscheidungsträger in Politik und Finanzwirtschaft nicht den Marktgesetzen zu, sondern den spekulativen Positionen, die auf den Terminmärkten von Investoren eingenommen wurden.

##### **Erdgas : eine Zukunftsenergie**

Jean-Marie Dauger

Die Stromerzeugung müsste zu einem wesentlichen Teil zum Wachstum des weltweiten Erdgasverbrauchs beitragen, und in jedweder betroffenen Region müsste sich der Zuwachs wie in den zurückliegenden 30 Jahren fortsetzen. Die Aufwendungen für Transport, Speicherung und Verteilung des Erdgases stellen jedoch durchschnittlich etwa 70 % der Gesamtkosten im Gassektor dar.

##### **Die neue Geopolitik im Kohlesektor**

Sylvie Cornot-Gandolphe

Seit Anfang der 2000er Jahre hat die Kohle, obwohl sie aus Umweltgründen stark kritisiert wird, wieder an Bedeutung zurückgewonnen: der weltweite Verbrauch ist von 2000 bis 2008 um 48 % gestiegen und stellt heute 27 % der Weltenergiebilanz und 41 % des Elektrizitätsmix dar. Dabei glaubte man sie zum Verschwinden verurteilt, da man sie als eine unmoderne Energie betrachtete – die mit der industriellen Revolution assoziiert wird, so dass die Stärke des aktuellen Wachstums zu erstaunen vermag.

##### **Die nuklearen Rohstoffe**

Bernard Bigot

Seit 1990 deckt die Jahresproduktion der Bergwerke nur 50 bis 60 % des Urangesamtverbrauchs der Reaktoren. Das ergänzende Angebot, das man „Sekundärressourcen“ nennt, entspricht dem Uran, das bereits extrahiert ist, d.h. es ist Material, das bereits gelagert oder bereits benutzt wurde, aber wieder aufgearbeitet wurde, um erneut verwendbar zu werden. Doch die überschüssigen zum Verkauf bestimmten Bestände sind nunmehr nahezu ausgeschöpft.

##### **Nachwachsende Brennstoffe : welches Entwicklungspotenzial ?**

Natalie Alazard-Toux

Die aktuellen Sektoren der Produktion von nachwachsenden Brennstoffen der ersten Generation werden mit realen Grenzen konfrontiert. Um die Folgen auszugleichen, konzentrieren sich die Bemühungen auf die Entwicklung von Verfahren, die es erlauben, wenig verwertete pflanzliche Ressourcen in Brennstoffe umzuwandeln. Diese Forschungstätigkeit betrifft ebenso die Ressourcen wie die Technologien und Verfahren der Brennstoffgewinnung.

#### Landwirtschaft

##### **Wie sollen neun Milliarden Menschen ernährt werden, ohne die Umwelt zu zerstören ?**

Michel Griffon

Zur Überwindung der malthusianischen Zwänge schlägt die agronomische Forschung verschiedene Wege ein. Der bekannteste besteht darin, die Lösung in einem Saatgut zu sehen, das durch Gentransfer verändert wird. Der andere Weg privilegiert die „intensive“ Nutzung der ökologischen Mechanismen der Ökosysteme und zieht die zusätzliche Verwendung konventioneller Techniken unter der Bedingung in Betracht, dass das Zusammenwirken dieser Faktoren ökologisch kohärent ist.

##### **Priorität für ein wirtschaftlich ausgerichtetes Denken in der Entwicklung der afrikanischen Landwirtschaft**

Bernard Bachelier

Mehr als 265 Millionen Afrikaner leiden Hunger. Doch Afrika ist potenziell eine der wichtigsten landwirtschaftlichen Reserven des Planeten. Aber die der eigenen Ernährung dienende afrikanische Landwirtschaft birgt zu viele Risiken, als dass sie private Investoren anziehe. Vorrangig muss also ein business-orientiertes Entwicklungsmodell dieses Sektors sein, das sich nicht damit begnügt, Markthindernisse durch die Liberalisierung der Wirtschaft zu beseitigen, sondern darauf abzielt, die Rentabilität der bestehenden Betriebe zu erhöhen.

## Metalle

### ***Das strategische Management der Staaten und Bergbaugesellschaften auf dem Gebiet der mineralischen Ressourcen : kommt es zu einer Entwicklung von Oligopolen ?***

Patrice Christmann und Bruno Martel-Jantin

9 Milliarden Menschen im Jahr 2050 mit mineralischen Rohstoffen zu versorgen, stellt eine beträchtliche strategische Herausforderung dar. Die Bergbauindustrie muss weltweit mit immer zahlreicheren strategischen Problemen und Risiken rechnen, besonders mit steigenden Investitions- und Betriebskosten.

### ***Die europäische Rohstoffinitiative***

Abraão de Carvalho

Vor etwas mehr als einem Jahr verabschiedete die EU-Kommission das strategische Dokument „Die Rohstoffinitiative – Sicherung der Versorgung Europas mit den für Wachstum und Beschäftigung notwendigen Gütern“, KOM (2008) 699, in dem eine kohärente und globale Politik vorgeschlagen wird, die auf die Herausforderungen auf dem Gebiet der industriellen Rohstoffe antworten soll.

### ***Die Erzvorkommen : ein Vorteil für die Entwicklung der sub-saharischen Länder Afrikas ?***

Paulo de Sa und Gary McMahon

Über die Frage, ob mineralische Ressourcen und Erdölvorkommen ein Vorteil für die Entwicklungsländer sind, insbesondere für die sub-

saharischen Länder Afrikas, wird seit fünfzehn Jahren in zunehmendem Maße kontrovers debattiert. Wir prüfen hier, auf welche Weise die mineralischen Ressourcen sich günstig auf die Entwicklung dieser Länder auswirken können.

### ***Lithium : ein strategisches Metall***

Antoine Guze

Die zwei wichtigsten Wachstumsrelais des mittelfristigen Lithiummarktes werden die Batterien der eingebetteten Systeme und die Batterien der Elektroautos sein. Die Presse kündigt sogar das Entstehen eines zukünftigen „Mittleren Ostens des Lithiums“ in der Region der Anden-Hochebene zwischen Bolivien, Argentinien und Chile an.

### ***Seltene Erden, strategische mineralische Rohstoffe***

Jean-Pierre Clamadieu und Emmanuel Butstraen

Aufgrund des unerlässlichen Bedarfs an seltenen Erden für zahlreiche Anwendungen, ist es in den kommenden Jahren äußerst wichtig, Lagerstätten außerhalb Chinas zu entwickeln, um die gegenwärtige Weltproduktion zu ergänzen und um die für die Industrie notwendige Versorgung sicherzustellen.

Koordinierung der Beiträge von Pierre-Noël Giraud und Pierre Couveinhes

## A nuestros lectores de lengua española...

### Las materias primas

#### Editorial

Bruno Sauvalle

#### Generalidades

##### Equidad y eficacia en el uso de los recursos naturales

Pierre-Noël Giraud

¿Tenemos derecho de agotar rápidamente las reservas de petróleo convencional a menos de 20 dólares el barril o debemos dejar un poco a las generaciones futuras? ¿En qué medida debemos preservar los suelos y los bosques nativos? ¿Cuál debe ser la importancia del esfuerzo de reducción del cambio climático que debemos emprender desde ahora? Antes de realizar cualquier análisis económico de estas preguntas, debemos tener en cuenta las decisiones sobre las normas de equidad intergeneracional e intrageneracional. Estas decisiones sólo podrán resultar de un proceso político.

##### La única certeza para 2010 es la inestabilidad

Philippe Chalmin

En comparación con los niveles muy bajos de comienzos de 2009, los precios de muchos productos se han duplicado hasta acercarse de nuevo a los extremos que habían alcanzado en la primavera de 2008. Del lado de la oferta, 2009 se caracteriza por los esfuerzos de los productores para ajustar sus exportaciones. Pero todo eso no habría bastado si no hubiera existido la China, su recuperación económica y sus necesidades de importación...

#### Energía

##### Las perspectivas de la oferta mundial de petróleo

Bruno Weymuller

El análisis de los recursos petroleros no sólo debe realizarse *below the ground*, sino también *above the ground*. La capacidad de producción industrialmente instalada constituye un cuello de botella anual que actúa como regulador de los flujos anuales de producción provenientes de las reservas petroleras. Esto nos obliga a prever, para la próxima década, un período petrolero llano, en vez de un pico petrolero.

##### Las evoluciones del precio del petróleo

Denis Babusiaux y Axel Pierru

El alza brutal del precio del petróleo observada en 2008, seguida de una caída importante, ha sido atribuida por la OPEP y ciertos responsables políticos y financieros, no a las fluctuaciones del mercado, sino a las posiciones especulativas tomadas por los inversionistas financieros sobre las operaciones a plazo.

##### El gas natural: una energía del futuro

Jean-Marie Dauger

La producción de electricidad debe contribuir al crecimiento del consumo de gas natural en el mundo, cualquiera que sea la región considerada, tal como lo demuestra el progreso evidenciado durante los 30 últimos años. No obstante, los sectores del transporte, almacenamiento y distribución de gas natural representan en promedio 70 % del coste total de la cadena gasífera.

##### La nueva geopolítica carbonera

Sylvie Cornot-Gandolphe

Desde el comienzo de los años 2000, el carbón, fuertemente criticado en el plano ambientalista, ha recuperado parte de su

popularidad de antaño. Su consumo mundial ha aumentado en un 48% entre 2000 y 2008, y representa actualmente el 27% del balance energético mundial y el 41% de la mezcla eléctrica. Cuando se creía que iba a desaparecer debido a su imagen de energía anticuada asociada a la revolución industrial, su crecimiento actual no deja de ser asombroso.

##### Las materias primas nucleares

Bernard Bigot

Desde 1990, la producción anual minera cubre sólo de 50 al 60 % del consumo total de los reactores de uranio. El complemento de oferta, conocido como «recursos secundarios», corresponde al uranio ya extraído; es decir, a la materia ya almacenada o utilizada, pero que se ha tratado para que pueda reutilizarse. Sin embargo, las reservas comerciales excedentes podrían agotarse pronto...

##### Biocombustibles: ¿cuál es su potencial de desarrollo?

Nathalie Alazard-Toux

Los límites de los sectores actuales de producción de biocombustibles de primera generación son reales. Para paliar con estos límites, los esfuerzos se concentran en el desarrollo de procedimientos que permitan la conversión de recursos vegetales poco valorizados en combustibles. Estos trabajos de investigación se realizan tanto sobre el recurso como sobre las tecnologías y procedimientos de transformación en combustible.

#### Agricultura

##### ¿Cómo alimentar nueve mil millones de personas sin destruir el medio ambiente?

Michel Griffon

Para salir de los límites maltusianos, la investigación agronómica explora diversas pistas. La más conocida consiste en hacer que las semillas aporten la solución, recurriendo a transferencias genéticas. La otra consiste en privilegiar la utilización «intensiva» de los mecanismos ecológicos de los ecosistemas y añadir subsidiariamente técnicas convencionales, a condición que el conjunto sea ecológicamente coherente.

##### Dar la prioridad a un enfoque económico del desarrollo de la agricultura africana

Bernard Bachelier

Más de 265 millones de africanos pasan hambre. Sin embargo, el África subsahariana es potencialmente una de las principales reservas de tierras agrícolas del planeta. Ahora bien, la agricultura alimenticia africana representa demasiados riesgos para atraer a los inversionistas privados. De esta forma, la prioridad debe darse a un enfoque *pro-business* del desarrollo de este sector, que no se contente con suprimir los obstáculos a los mercados a través las liberalizaciones de la economía, sino que trate de aumentar la rentabilidad de los establecimientos existentes.

#### Metales

##### La gestión estratégica de los recursos minerales por los Estados y las empresas mineras: ¿hacia un desarrollo de los oligopolios?

Patrice Christmann y Bruno Martel-Jantin

Garantizar el abastecimiento de 9 mil millones de seres humanos en recursos minerales en 2050 representa un gran desafío estratégico. La industria mineral mundial debe enfrentar, cada vez más, un número importante de asuntos estratégicos y de riesgos, especialmente costes de inversión y de explotación crecientes.

***La iniciativa europea sobre las materias primas***

Abraão de Carvalho

Hace poco más de un año, la Comisión europea adoptaba un documento estratégico: "La iniciativa de las materias primas: cubrir las necesidades fundamentales en Europa para generar crecimiento y empleo" – COM (2008) 699, que propone un enfoque coherente y global para hacer frente a los desafíos que se presentan en el campo de las materias primas industriales.

***Los recursos minerales: ¿un triunfo para el desarrollo del África subsahariana?***

Paulo de Sa y Gary McMahon

La pregunta de saber si los recursos minerales y los hidrocarburos son un triunfo para los países en desarrollo, en particular para el África subsahariana, ha sido desde quince años el objeto de un debate cada vez más vivo. En este artículo se examina la manera en la que los recursos minerales pueden tener efectos benéficos sobre el desarrollo de los países del África subsahariana.

***El litio, un metal estratégico***

Antoine Gouze

Las dos principales palancas de crecimiento del mercado del litio a mediano plazo serán las baterías de los sistemas embarcados y las baterías de los vehículos eléctricos. La prensa anuncia también la llegada de un futuro "Oriente Medio del litio", en la región del altiplano andino entre Bolivia, Argentina y Chile.

***Las tierras raras, materias minerales estratégicas***

Jean-Pierre Clamadieu y Emmanuel Butstraen

Teniendo en cuenta el carácter ineludible de las tierras raras en numerosas aplicaciones, uno de los problemas de los años por venir es el desarrollo de yacimientos fuera de China, para completar la producción mundial actual y asegurar el aprovisionamiento indispensable a la industria.

Este dossier fue coordinado por Pierre-Noël Giraud y Pierre Couveinhes

Publié par  
**ANNALES  
 DES  
 MINES**  
 Fondées en 1794

**F**ondées en 1794, les Annales des Mines comptent parmi les plus anciennes publications économiques. Consacrées hier à l'industrie lourde, elles s'intéressent aujourd'hui à l'ensemble de l'activité industrielle en France et dans le monde, sous ses aspects économiques, scientifiques, techniques et socio-culturels.

**D**es articles rédigés par les meilleurs spécialistes français et étrangers, d'une lecture aisée, nourris d'expériences concrètes : les numéros des Annales des Mines sont des documents qui font référence en matière d'industrie.

**L**es *Annales des Mines* éditent trois séries complémentaires :

**Responsabilité & Environnement,  
 Réalités Industrielles,  
 Gérer & Comprendre.**

#### RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

**Q**uatre fois par an, cette série des *Annales des Mines* propose de contribuer aux débats sur les choix techniques qui engagent nos sociétés en matière d'environnement et de risques industriels. Son ambition : ouvrir ses colonnes à toutes les opinions qui s'inscrivent dans une démarche de confrontation rigoureuse des idées. Son public : industries, associations, universitaires ou élus, et tous ceux qui s'intéressent aux grands enjeux de notre société.

#### RÉALITÉS INDUSTRIELLES

**Q**uatre fois par an, cette série des *Annales des Mines* fait le point sur un sujet technique, un secteur économique ou un problème d'actualité. Chaque numéro, en une vingtaine d'articles, propose une sélection d'informations concrètes, des analyses approfondies, des connaissances à jour pour mieux apprécier les réalités du monde industriel.

#### GÉRER & COMPRENDRE

**Q**uatre fois par an, cette série des *Annales des Mines* pose un regard lucide, parfois critique, sur la gestion « au concret » des entreprises et des affaires publiques. *Gérer & Comprendre* va au-delà des idées reçues et présente au lecteur, non pas des recettes, mais des faits, des expériences et des idées pour comprendre et mieux gérer.

L'INDUSTRIE  
 AU  
 CONCRET

**ABONNEZ-VOUS  
 AUX  
 ANNALES DES MINES**

**RESPONSABILITÉ**

**& ENVIRONNEMENT**

et

**RÉALITÉS INDUSTRIELLES**

et

**GÉRER & COMPRENDRE**

**DEMANDE DE  
 SPÉCIMEN**

## BULLETIN D'ABONNEMENT

A retourner accompagné de votre règlement  
aux Editions ESKA <http://www.eska.fr>  
12, rue du Quatre-Septembre - 75002 Paris  
Tél. : 01 42 86 55 73 - Fax : 01 42 60 45 35

Je m'abonne pour 2010, aux Annales des Mines

### Responsabilité & Environnement

4 numéros	France	Etranger
au tarif de :		
Particuliers	<input type="checkbox"/> 83 €	<input type="checkbox"/> 101 €
Institutions	<input type="checkbox"/> 108 €	<input type="checkbox"/> 130 €

### Responsabilité & Environnement + Réalités industrielles

8 numéros	France	Etranger
au tarif de :		
Particuliers	<input type="checkbox"/> 158 €	<input type="checkbox"/> 190 €
Institutions	<input type="checkbox"/> 198 €	<input type="checkbox"/> 257 €

### Responsabilité & Environnement + Réalités industrielles + Gérer & Comprendre

12 numéros	France	Etranger
au tarif de :		
Particuliers	<input type="checkbox"/> 202 €	<input type="checkbox"/> 255 €
Institutions	<input type="checkbox"/> 299 €	<input type="checkbox"/> 357 €

Nom .....

Fonction .....

Organisme .....

Adresse .....

.....

Je joins :  un chèque bancaire  
à l'ordre des Editions ESKA  
 un virement postal aux Editions ESKA,  
CCP PARIS 1667-494-Z  
 je souhaite recevoir une facture

## DEMANDE DE SPÉCIMEN

A retourner à la rédaction des Annales des Mines  
120, rue de Bercy - Télédock 797 - 75572 Paris Cedex 12  
Tél. : 01 53 18 52 68 - Fax : 01 53 18 52 72

Je désire recevoir, dans la limite des stocks  
disponibles, un numéro spécimen :

de la série **Responsabilité & Environnement**  
 de la série **Réalités industrielles**  
 de la série **Gérer & Comprendre**

Nom .....

Fonction .....

Organisme .....

Adresse .....

.....

Publié par  
**ANNALES  
DES  
MINES**  
Fondées en 1794

**F**ondées en 1794, les Annales des Mines comptent parmi les plus anciennes publications économiques. Consacrées hier à l'industrie lourde, elles s'intéressent aujourd'hui à l'ensemble de l'activité industrielle en France et dans le monde, sous ses aspects économiques, scientifiques, techniques et socio-culturels.

**D**es articles rédigés par les meilleurs spécialistes français et étrangers, d'une lecture aisée, nourris d'expériences concrètes : les numéros des Annales des Mines sont des documents qui font référence en matière d'industrie.

**L**es Annales des Mines éditent trois séries complémentaires :

**Responsabilité & Environnement,  
Réalités Industrielles,  
Gérer & Comprendre.**

### RESPONSABILITÉ & ENVIRONNEMENT

**Q**uatre fois par an, cette série des *Annales des Mines* propose de contribuer aux débats sur les choix techniques qui engagent nos sociétés en matière d'environnement et de risques industriels. Son ambition : ouvrir ses colonnes à toutes les opinions qui s'inscrivent dans une démarche de confrontation rigoureuse des idées. Son public : industries, associations, universitaires ou élus, et tous ceux qui s'intéressent aux grands enjeux de notre société.

### RÉALITÉS INDUSTRIELLES

**Q**uatre fois par an, cette série des *Annales des Mines* fait le point sur un sujet technique, un secteur économique ou un problème d'actualité. Chaque numéro, en une vingtaine d'articles, propose une sélection d'informations concrètes, des analyses approfondies, des connaissances à jour pour mieux apprécier les réalités du monde industriel.

### GÉRER & COMPRENDRE

**Q**uatre fois par an, cette série des *Annales des Mines* pose un regard lucide, parfois critique, sur la gestion « au concret » des entreprises et des affaires publiques. *Gérer & Comprendre* va au-delà des idées reçues et présente au lecteur, non pas des recettes, mais des faits, des expériences et des idées pour comprendre et mieux gérer.

L'INDUSTRIE  
AU  
CONCRET