

Les matériaux stratégiques pour l'énergie

Bruno Goffé est chercheur au Centre de recherche et d'enseignement des géosciences pour l'environnement (CEREGE), à l'université d'Aix-Marseille. Après avoir été directeur adjoint de l'Institut national des sciences de l'univers (INSU), il est aujourd'hui en charge de la question du suivi des actions de recherche sur les ressources géologiques au niveau national pour le CNRS et l'INSU. Il est co-coordonateur du réseau de recherche européen ERa-MIN, sur les ressources minérales.

Produire et exploiter l'énergie demande des installations et des dispositifs – donc des matériaux. L'accroissement prévisible de la population de la planète au cours des décennies à venir ainsi que l'évolution des modes de vie laissent prévoir un très fort accroissement de la demande mondiale en énergie et corrélativement de la demande en matériaux. Ce chapitre s'intéresse aux matériaux métalliques à l'exclusion des métaux énergétiques tels que l'uranium.

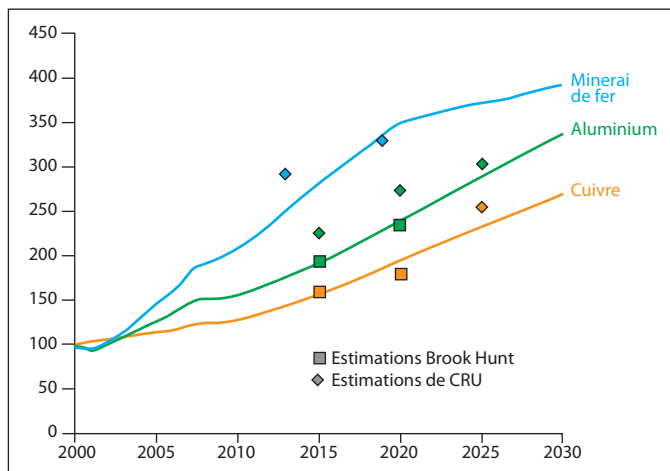
1 L'accroissement considérable de la demande en métaux de base

La **Figure 1** esquisse l'évolution entre les années 2000 et 2030 de la demande en trois métaux de base, le cuivre, l'aluminium et le fer. Les besoins sont multipliés par 2,5 pour le cuivre, par 3,5 pour le fer et l'aluminium est intermédiaire.

Plus généralement, l'accroissement de la consommation en matières premières

Figure 1

Estimation sur une base cent en 2000 de l'évolution de la consommation globale en trois métaux de base (les autres métaux croissant de 3,6 % par an) : une demande considérablement accrue, d'après une analyse de Rio Tinto 2010.



minérales est une tendance de fond, et s'est manifestée tout au long du XX^e siècle. La **Figure 2A** donne l'évolution cumulée des quantités produites pour 14 matières premières non énergétiques, détaillée sur la **Figure 2B** pour 11 métaux. Les quantités en jeu sont considérables, passant de quelques centaines de millions à plusieurs milliards de tonnes en cent ans. La corrélation de cette évolution avec le PIB mondial apparaît sur la **Figure 2C**, avec même une croissance plus rapide des besoins en métaux¹.

Ce fort accroissement inspire bien entendu les stratégies géopolitiques ; l'exemple de la Chine est ainsi spectaculaire. La **Figure 3** l'illustre en montrant les prises de participations de ce pays dans l'industrie minière mondiale en 2004, 2009 et 2010. La part de la Chine dans la production mondiale excède largement son poids économique d'aujourd'hui comme il ressort du diagramme de la **Figure 4** cor-

respondant aux 28 matières premières dont elle est premier producteur.

2 La diversité des métaux exploités et leur disponibilité

L'analyse de la demande en matières premières – particulièrement en métaux – recoupe celle de l'histoire des civilisations (**Figure 5**). Depuis des millénaires, on exploite le cuivre (âge du bronze, 7 000 ans) et le fer (3 000 ans). En revanche, les métaux légers ne sont exploités que depuis une centaine d'années, et les métaux technologiques (comme les terres rares) depuis une vingtaine d'années seulement.

La connaissance des réserves géologiques des métaux est incomplète, et c'est particulièrement vrai pour ces métaux technologiques que l'on n'exploite que depuis peu. Si la géologie joue son rôle, elle ne détermine pas seule la répartition des lieux de production, en fait fortement corrélée au PIB des

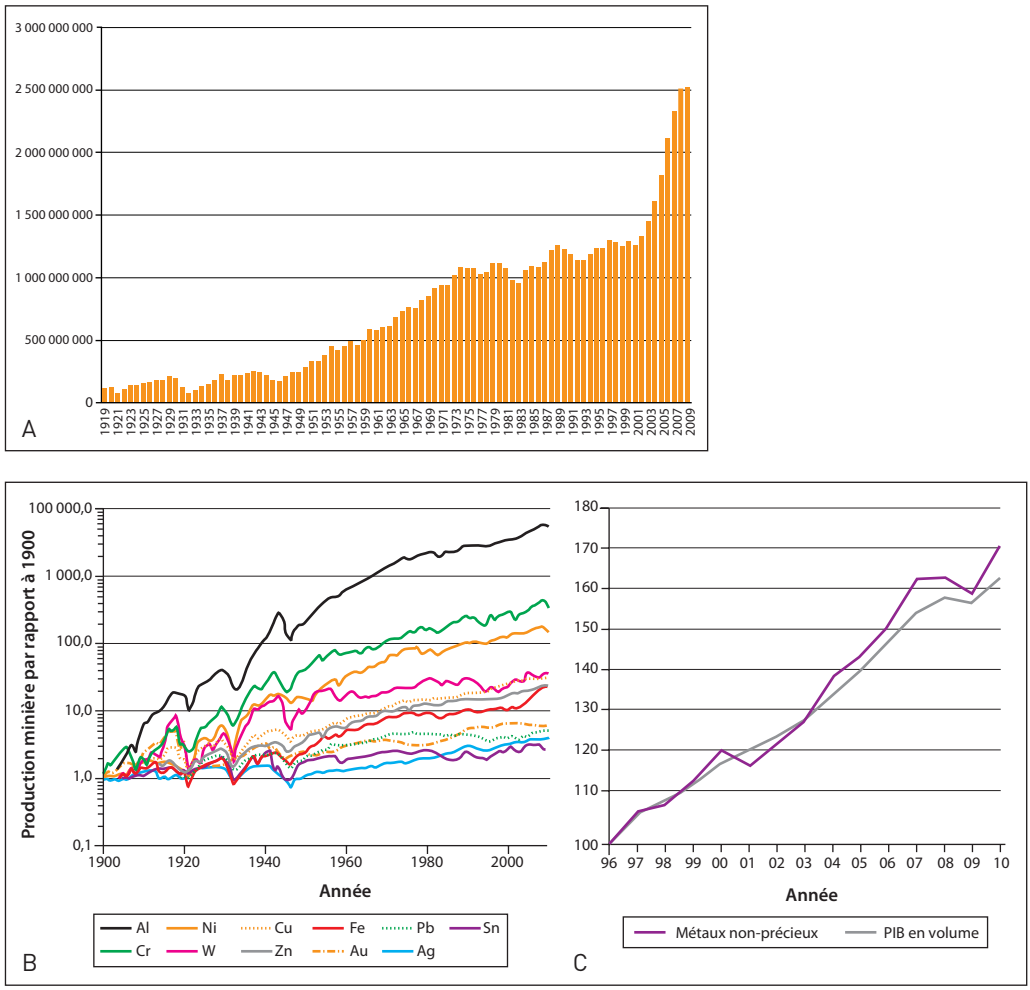


Figure 2

A. Évolution de la production de 14 matières premières non énergétiques depuis le début du XX^e siècle (Al, Au, Ba, Co, Cu, Fe, K₂O, Mn, Ni, P, Pb, Pt, Zn).

Source : USGS.

B. Taux relatifs de l'utilisation mondiale de matières au xx^e siècle. Le taux d'utilisation pour chaque métal est normalisé à l'unité en 1900.

Source : T.E. Graedel et Lorenz Erdmann, MRS 2012.

C. Consommation de métaux non précieux et PIB dans le monde (100 en 1996).

Source : World Metal Statistics, prévisions NATIXIS.

zones de production. Il ressort bien du diagramme de la **Figure 6** que les pays à faible PIB produisent la plus grande partie des matières premières, ce qui pourrait être lié à la question de l'accepta-

tion du travail de la mine par les populations concernées. Les populations des pays défavorisés accepteraient plus facilement de « mettre la main au charbon » que les pays plus riches.

Figure 3

Prises de participations chinoises dans l'industrie minière mondiale.

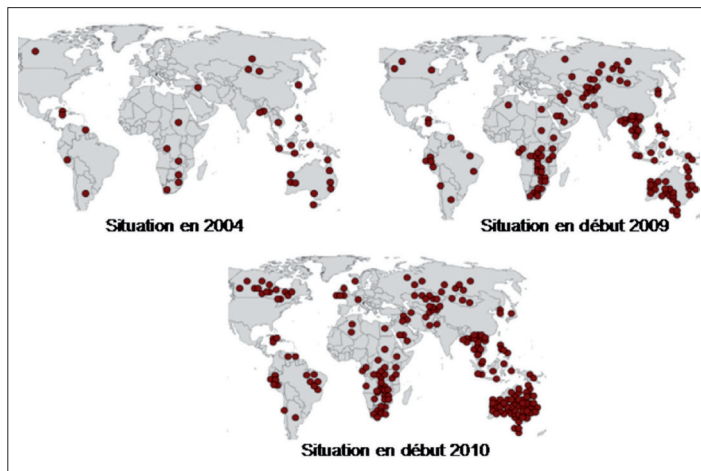


Figure 4

Taux de production minière de la Chine en % de la production mondiale pour les vingt-huit matières premières dont elle est le premier producteur. Ces chiffres montrent un impact fort des stratégies géopolitiques de ce pays.

Source : D'après Patrice Christmann, BRGM 2011, World Mining data

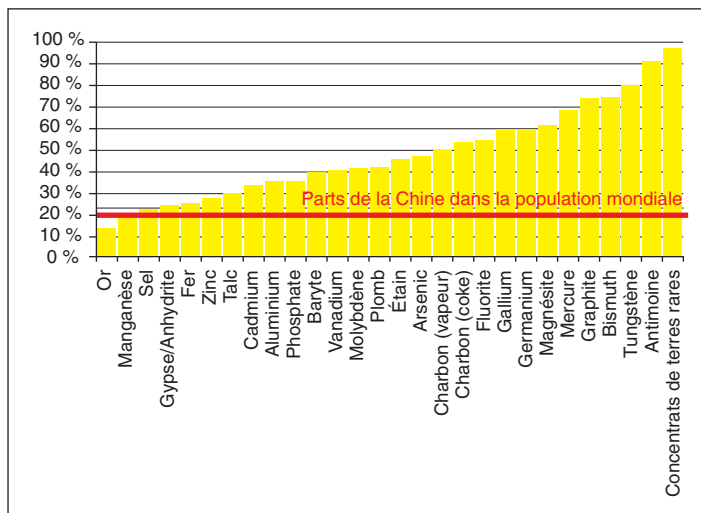
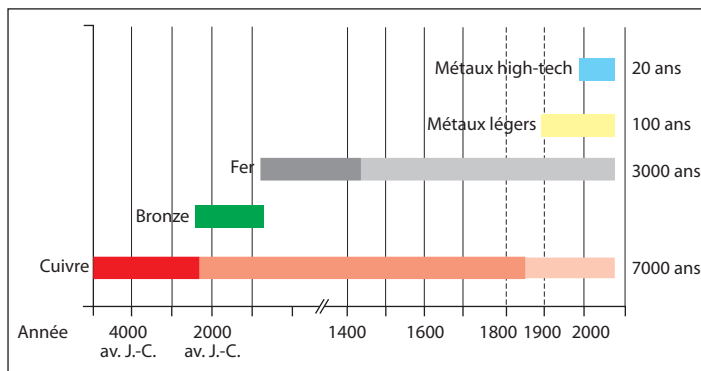


Figure 5

Chronologie illustrant l'utilisation de métaux de la préhistoire aux temps modernes en Europe centrale.

Source : Wellmer et Steinbach, 2011



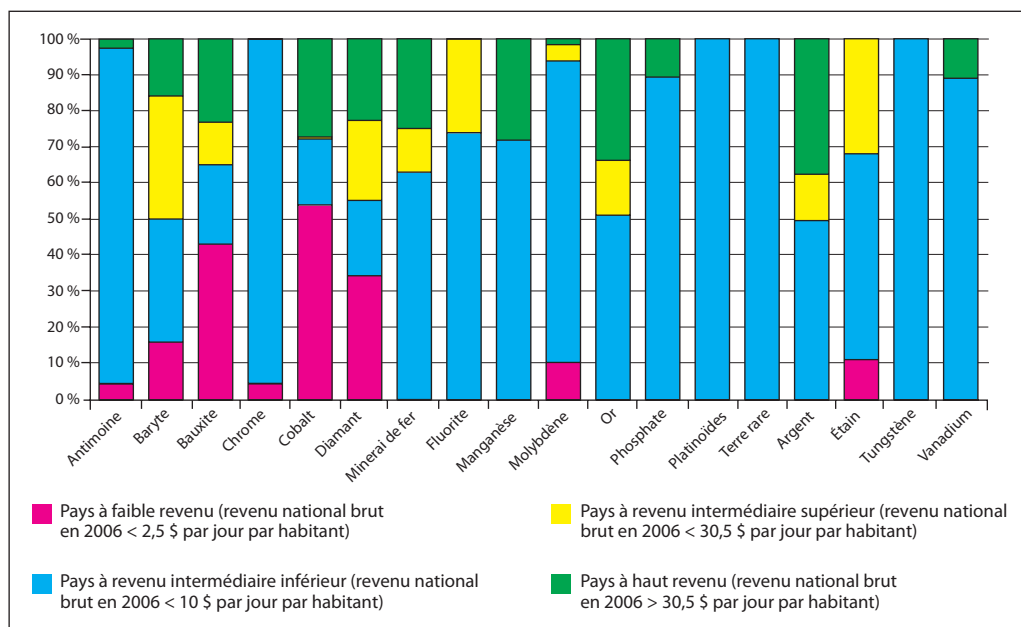


Figure 6

Localisation des réserves des principales matières premières minérales en fonction du PIB (USGS et Banque mondiale).

Source : P. Christmann, BRGM, 2011

Tableau 1

Taux de dépendance de l'Europe aux principales matières premières non énergétiques. L'Europe ne produit qu'environ 3 % des matières premières qu'elle utilise. En rouge, apparaissent les matières premières pour lesquelles la Chine est le premier producteur.

Sources (2009) : USGS, BRGM, PGI, WMD

Antimoine	100 %	Vanadium	100 %
Beryllium	100 %	Étain	100 %
Bore	100 %	Phosphates	92 %
Manganèse	100 %	Rhénium	90 %
Cobalt	100 %	Nickel	86 %
Molybdène	100 %	Minerai de fer	83 %
Niobium	100 %	Bauxite	80 %
Platinoïdes	100 %	Zinc	80 %
Terres rares	100 %	Tungstène	76 %
Tantale	100 %	Plomb	76 %
Titane	100 %	Cuivre	74 %
Germanium	100 %	Chromite	53 %

L'Europe est dans une situation de grande dépendance quant à ses ressources en matières premières minérales ; elle ne produit que 3 % de ce qu'elle utilise. Le **Tableau 1** le précise en fonction des éléments dont un grand nombre est produit à l'extérieur – et particulièrement en Chine. L'élément le plus produit en Europe, la chromite, ne couvre les besoins qu'à 47 %.

3 Le cas des matériaux pour l'énergie

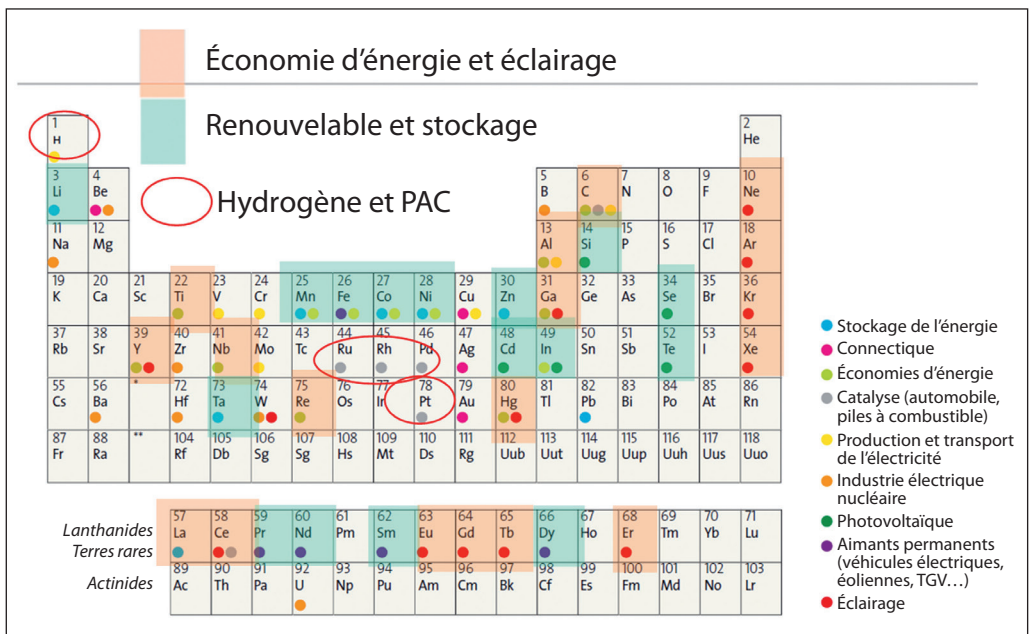
La **Figure 7** présente un tableau de Mendeleïev où ressortent en couleurs les éléments utilisés dans différents types d'énergie – montrant au passage le très grand nombre de métaux utilisés pour la production et l'exploitation de l'énergie. Y figurent ainsi les métaux et les éléments utilisés dans les économies

d'énergie et l'éclairage, en particulier les terres rares. Ces éléments, appelés aussi lanthanides, sont rassemblés dans l'avant-dernière ligne du tableau juxtaposée à la série des actinides (éléments radioactifs parmi lesquels se trouve l'uranium d'où l'on extrait l'énergie nucléaire. (Voir les **Chapitres de B. Bigot ; de F. Drain ; de B. Boullis**). Colorés en rose, on trouve des éléments utilisés dans l'éclairage et les économies d'énergie associées : plusieurs terres rares ; les gaz rares ; d'autres éléments comme l'yttrium, le titane, le niobium ou le rhénium. Colorés en bleu et vert, on trouve les éléments utilisés dans les énergies renouvelables et le stockage de l'énergie, soit à la fois des métaux de base et des métaux rares. Parmi ceux-ci, il y a de nouveau des terres rares, et en particulier les terres rares « lourdes » (plus l'élément

Figure 7

Éléments chimiques mis en œuvre dans différentes technologies du domaine de l'énergie.

Source : P. Christmann, BRGM



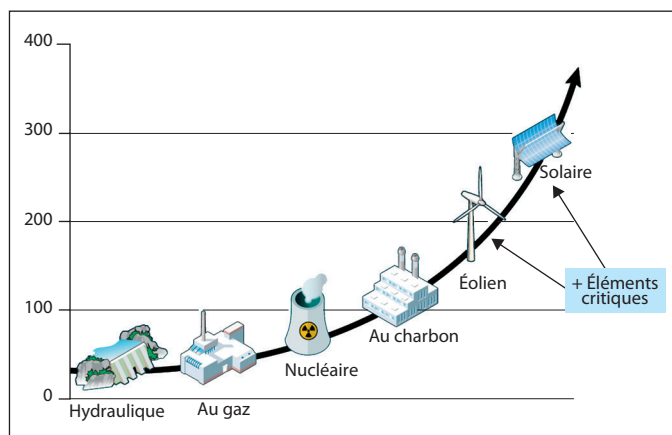


Figure 8

Quantité d'acier pour différentes technologies de l'énergie, en kilogrammes par mégawatt.

Source : Albanese et al., 2011, Investor Seminar

est situé vers la droite du tableau, plus il est lourd) qui sont utilisées dans les systèmes d'exploitation – en particulier dans les aimants qui servent à faire fonctionner les éoliennes. Figure également le lithium, très utilisé dans les batteries pour le stockage de l'énergie (au sujet du stockage de l'énergie, voir le [Chapitre de M. Perrin](#)). Entourés de rouge, on a indiqué l'hydrogène utilisé dans les piles à combustible avec les métaux catalyseurs ruthénium, rhénium et platine. Notons ici que l'hydrogène peut aussi être une ressource primaire et pas seulement un vecteur d'énergie puisque la Terre en produit dans la ride médio-océanique (peut-être de l'ordre de dix millions de tonnes par an), ainsi probablement que par des sources continentales encore mal connues.

Cet examen du tableau des éléments montre qu'on ne peut penser produire et exploiter d'énergie – et particulièrement d'énergie renouvelable – sans faire usage de métaux. La [Figure 8](#) précise cette observation par des ordres de grandeur. Elle re-

présente la quantité d'acier utilisée par mégawatt d'énergie selon les différentes sources d'énergie – ce qu'on appelle « **l'empreinte acier** ». L'hydraulique est le moins consommateur de métal, suivi par les centrales à gaz, le nucléaire, les centrales à charbon, les éoliennes puis le solaire thermique qui arrive à 300 tonnes d'acier par mégawatt. Paradoxalement peut-être, **plus les énergies sont à faible densité, plus elles consomment de matière première par mégawatt.**

4 La transition énergétique entraîne une demande en énergie croissante

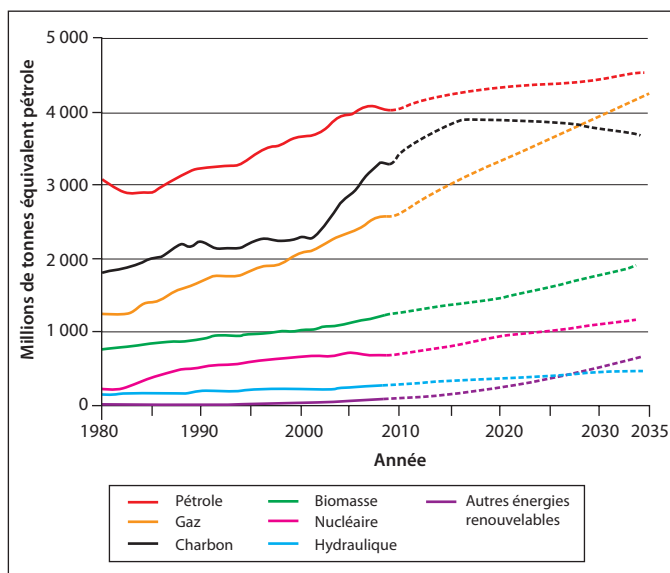
Les politiques énergétiques se construisent à partir d'arbitrages entre contraintes multiples au moyen de scénarios qui envisagent des hypothèses sur la consommation et la disponibilité des ressources. Ici, il s'agit spécifiquement des ressources en métaux.

Un scénario proposé par l'Agence internationale pour l'énergie est repris sur la [Figure 9](#) ; il résume l'évolu-

Figure 9

Demande mondiale d'énergie primaire par type de combustible. Les ressources fossiles restent largement majoritaires, la part du gaz augmente considérablement avec un accroissement des énergies renouvelables dont la part devrait passer au niveau mondial de 1 % en 2008 à 4 % en 2035, soit de 89 à 699 Mtep (x 9).

Source : WEC 2011



tion de la demande en énergie primaire par type de combustible – c'est-à-dire décrit le « mix » énergétique. À l'horizon 2035, selon ce scénario, le charbon devrait chuter en production, le pétrole continuer à monter, le gaz monter plus fortement ; l'hydraulique et le nucléaire continuent à croître, mais modérément ; la biomasse connaît une croissance spectaculaire, plus encore que les autres énergies renouvelables (éolien et solaire), qui restent très minoritaires dans le mix. La part du renouvelable dans le mix, de 1 % au niveau mondial en 2008, est prévue par ce scénario à 4 % en 2035, ce qui fait une augmentation par huit de la production d'énergie, qui passe de 89 à 700 millions de tonnes d'équivalents pétrole.

Pour appréhender l'évolution de la demande en métaux associée à la transition énergétique (production, transport et utilisation), un horizon

plus éloigné que 2035 paraît nécessaire. On se rapporte alors de préférence à l'étude du World Energy Council, publiée en 2007, et qui envisage une vision jusqu'à l'année 2050. Elle considère quatre scénarios (S1, S2, S3 et S4, Figure 10) que différencient des paramètres politiques – degré d'engagement du gouvernement et degré d'autonomie des technologies impliquées. Pour S1 et S2, l'intégration du système énergétique est plus faible que pour S3 et S4 ; pour S1 et S4, la contrainte gouvernementale est plus faible que pour S2 et S3.

Les mix énergétiques correspondant à ces scénarios sont présentés Figure 10 (A, B, C et D) – en noir le charbon, en bleu les huiles et en jaune le renouvelable, vent et solaire. Le scénario S1 fait un appel important aux hydrocarbures alors que S4 donne une priorité aux

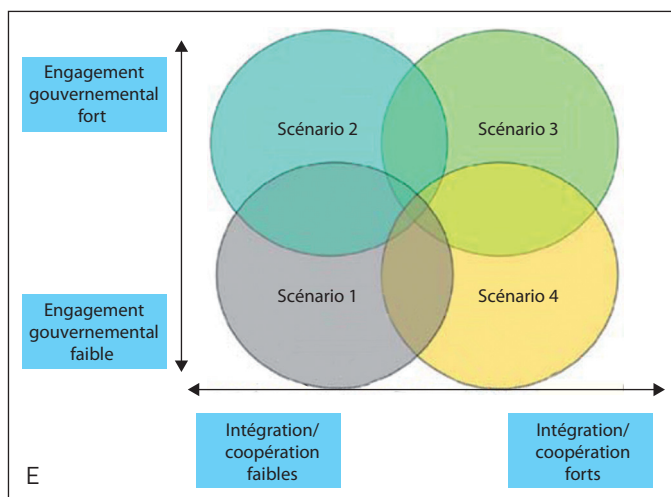
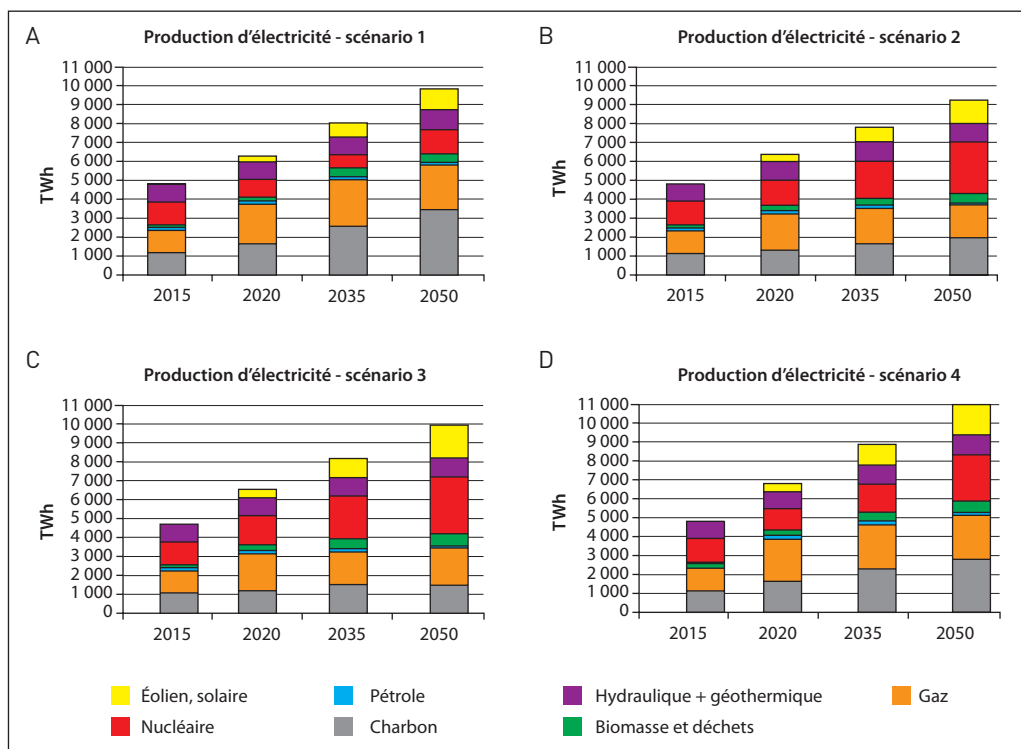


Figure 10

Vision du mix énergétique jusqu'à 2050 : quatre scénarios du WEC (World Energy Council, 2007). Les énergies renouvelables devraient en Europe passer de 3 % en 2005 à 17-24 % en 2035, puis 25-35 % en 2050, soit de 39 à 900 GW installés ($\times 15$ à $\times 22$ selon les scénarios).

renouvelables. De tels scénarios ont été discutés dans le **Chapitre de M. Criqui** de cet ouvrage. Ils prévoient une production d'énergie renouvelable passant de 3 % à 35 % entre 2005 et 2050,

c'est-à-dire de 40 à 900 GW installés. L'accroissement de l'appel aux énergies renouvelables est de toute façon considérable, d'un facteur de l'ordre de 15 à 22 en Europe selon les scénarios.

5 Conséquence du développement des renouvelables sur la demande en métaux de base : exemple de l'acier

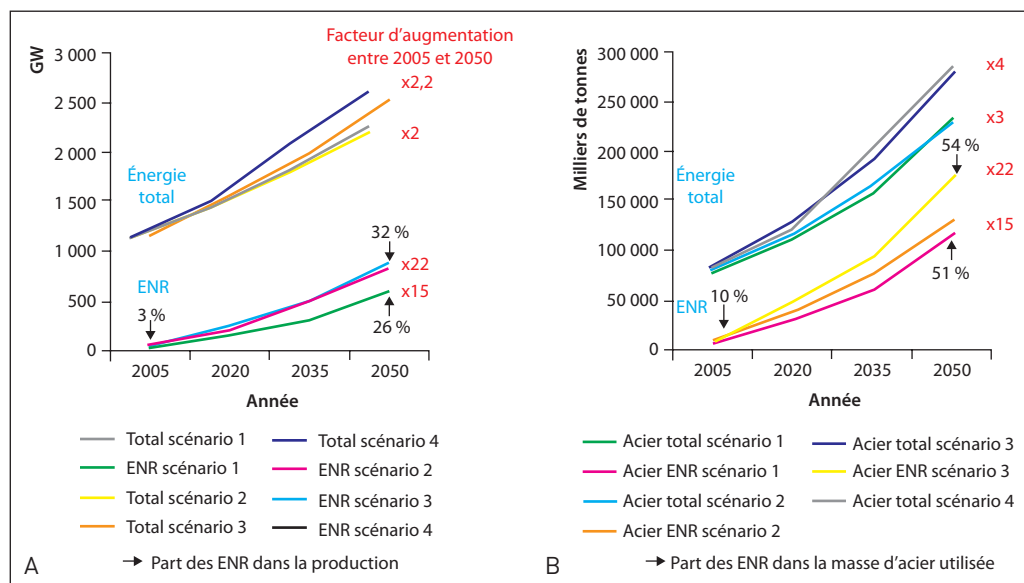
Le moteur des politiques énergétiques aujourd'hui est d'augmenter la part des énergies renouvelables puisque les ressources fossiles deviennent rares et coûteuses. Mais l'« **empreinte acier** » de certaines des énergies renouvelables est supérieure à celle des énergies fossiles, du moins avec les technologies employées actuellement. L'évolution de la politique énergétique va donc impacter celle de la consommation en acier, un phénomène dont il convient d'estimer l'ampleur, l'importance économique ainsi que les conséquences géostratégiques.

Pour ce faire, les quatre scénarios du World Energy Council sont examinés sous l'angle de la consommation en acier. La **Figure 11A** retrace,

selon les scénarios, l'accroissement de la production totale d'énergie électrique en Europe entre 2005 et 2050, la **Figure 11B** les conséquences sur les besoins en acier. Sur cette période, la part des énergies renouvelables devrait passer de 3 % à 35 % – c'est-à-dire de 40 GW à 900 GW –, un facteur d'accroissement de 15 à 22 selon les scénarios. La consommation d'acier quant à elle (voir **Figure 11B**) s'accroîtrait globalement d'un facteur qui irait de trois à quatre, avec une part de cette consommation due aux énergies renouvelables qui passerait de 10 % aujourd'hui à environ 64 % en 2050 dans une hypothèse conservatrice où ces énergies nécessiteraient 200 tonnes de production d'acier par mégawatt installé sans renouvellement des installations sur cette période. La consommation annuelle supplémentaire en acier ressort ainsi, de maintenant à 2050, à environ cinq millions de tonnes pour l'Europe.

Figure 11

Empreinte acier pour les différents scénarios du WEC 2007 en Europe. La production d'acier serait à augmenter de cinq millions de tonnes par an. ENR = Énergies renouvelables. **A.** Puissance électrique installée. **B.** Acier nécessaire.



Un tel accroissement est évidemment porteur de conséquences importantes sur la production et le commerce mondial de l'acier et des matières premières que sa production réclame (minerai de fer et charbon). La **Figure 12** représente les flux mondiaux de matières premières : les échanges sont dominés par la demande chinoise et les offres australienne et bré-

silienne, l'Europe n'ayant pratiquement pas de rôle sur l'équilibre des prix déterminé par la loi de l'offre et de la demande. En revanche, l'acier lui-même reste essentiellement une production locale, ne donnant pas lieu à d'importants flux planétaires. La **Figure 13** rappelle que le commerce de l'acier, en ce qui concerne l'Europe, reste régional : l'équilibre euro-

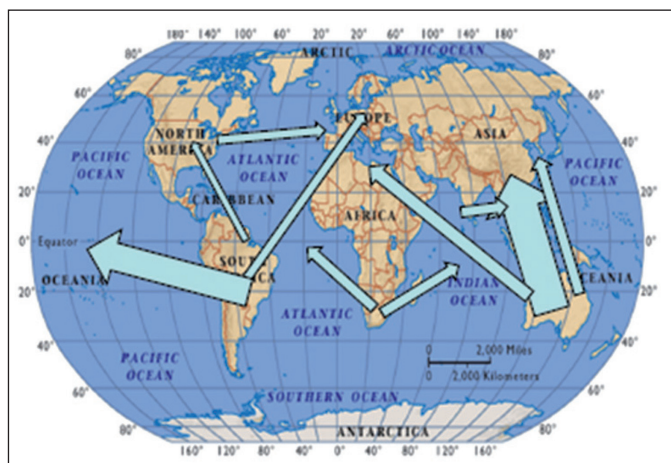


Figure 12

Commerce mondial des matières premières. Les matières premières sont mondialisées, mais la transformation en acier reste régionale. Le minerai de fer et de charbon sont mondialisés et l'équilibre de l'offre et de la demande est très largement régulé par la demande chinoise et l'offre australienne et brésilienne. L'Europe n'est plus pertinente dans cet équilibre.

Source : Laplace Conseil (<http://www.usinenouvelle>)



Figure 13

Commerce régional de l'acier. La production d'acier reste une activité régionale, les échanges intercontinentaux sont faibles et peu pérennes. L'équilibre européen repose sur la demande européenne et sur les capacités disponibles.

Source : Laplace Conseil (<http://www.usinenouvelle>)

péen repose sur la demande et les capacités disponibles européennes.

Comment l'accroissement des besoins en acier prévus par les scénarios de production d'énergie va-t-il pouvoir être absorbé ? La comparaison entre les situations en Europe et aux États-Unis est ici pertinente. Le diagramme de la **Figure 14** rappelle que les États-Unis produisent aujourd'hui 124 millions de tonnes par an et importent de l'acier, alors que l'Europe produit 172 millions de tonnes et exporte de l'acier. Par comparaison, la Chine produit aujourd'hui 600 millions de tonnes d'acier par an. Les capacités d'augmentation des productions sont estimées à 26 millions de tonnes par an pour les États-Unis, et 8 millions de tonnes par an pour l'Europe en 2020.

La conclusion de ces estimations est que l'accroissement de la demande en acier associée au développement des énergies renouvelables en Europe pourrait absorber plus de 60 % des possibilités d'accroissement de ses capacités de production d'acier. Une situation évidemment potentiellement génératrice de tensions sur le marché avec des conséquences sur l'industrie de l'automobile et sur celle du bâtiment qui

consomment aujourd'hui à elles deux près de la moitié de l'acier produit en Europe. En ce qui concerne les États-Unis, on peut remarquer que les capacités de production d'acier sont principalement situées sur les grands gisements de gaz de schistes, ce qui peut ouvrir de plus larges perspectives de développement (**Figure 15**).

6 Conséquence sur les petits métaux : exemple des terres rares

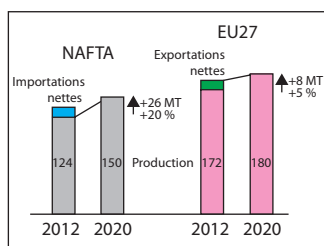
L'utilisation aujourd'hui la plus stratégique des terres rares est la fabrication d'aimants permanents pour moteurs et générateurs électriques. Elle concerne surtout deux des terres rares, le néodyme, une terre rare légère, et le dysprosium, une terre rare lourde. Cette utilisation représente environ 21 % de la consommation totale en terres rares et devrait beaucoup s'accroître dans les années qui viennent. L'éclairage (voir plus haut) en utilise environ 8 %, les catalyseurs 20 %, et les matériaux 51 % (verres, alliages, céramiques, polissage). Dans le futur, d'autres utilisations pourront apparaître (le gadolinium dans la réfrigération par exemple).

La **Figure 16** montre un scénario probable d'équipement en véhicules dans le monde. Les plages en rouge correspondent aux véhicules électriques (hybrides, voitures purement électriques, voitures à hydrogène). Les autres sont les voitures classiques, à essence ou gasoil. Une très forte augmentation

Figure 14

Production annuelle d'acier en Europe et aux États-Unis. La production américaine d'acier devrait se redresser plus vite que celle de l'Europe grâce à un accès à l'énergie (gaz) à faible coût. La demande en acier venant du secteur de l'énergie en Europe représentera plus de 60 % des capacités de production : une tension probable sur le secteur (les principaux utilisateurs d'acier en Europe sont le bâtiment (27 %) et l'automobile (16 %)).

Source : l'Usine Nouvelle (www.usinenouvelle.com)



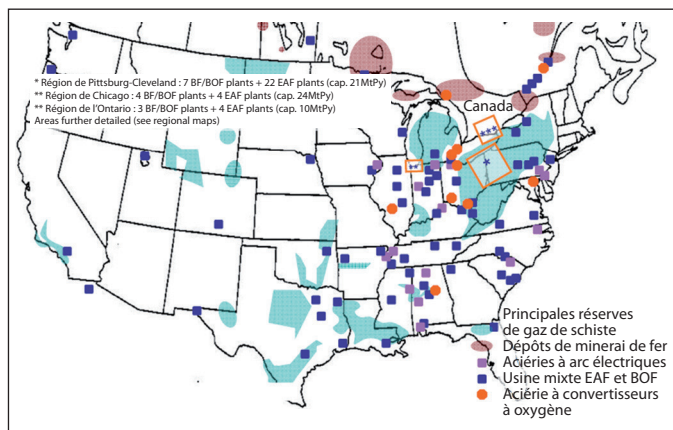


Figure 15

La plus grande part de la sidérurgie américaine est implantée sur les grands gisements de gaz de schistes.

Source : L'Usine Nouvelle (www.usinenouvelle.com)

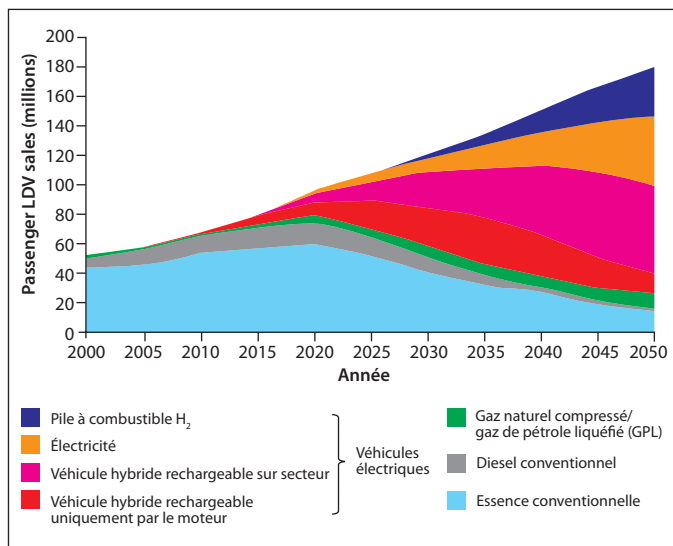


Figure 16

Évolution du marché de l'automobile 2000-2050. Les principales utilisations des terres rares sont dans les aimants (néodyme et dysprosium) pour les moteurs et générateurs électriques (21 %), l'éclairage (8 %), les catalyseurs (20 %), les matériaux (51 % : verres, alliages, céramiques, polissage) et dans le futur la réfrigération (gadolinium). Il y a une très forte demande sur les moteurs et générateurs électriques à haut rendement.

Source : ETP 2010

des véhicules électriques, créant une forte demande de moteurs électriques et donc de consommation d'aimants est prévue.

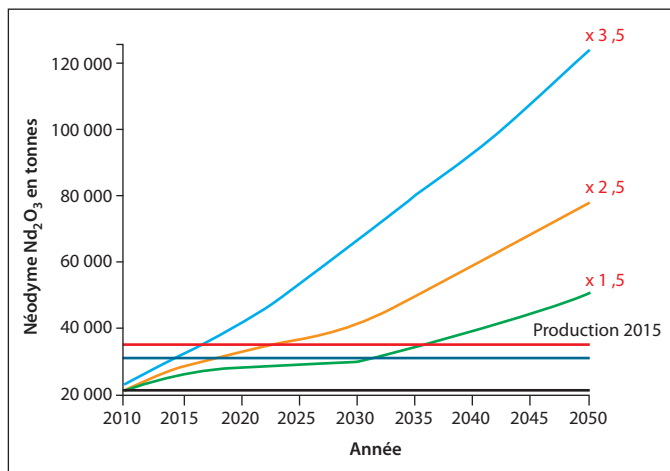
La deuxième origine d'un accroissement de la demande en aimants permanents est le développement du parc éolien. Les aimants permanents en utilisent environ 200 kg/MW de néodyme et 30 kg/MW de dysprosium. Une autre technologie, aujourd'hui à l'étude, utilise des supraconducteurs qui demandent

de l'yttrium, également un élément rare sans qu'il soit chimiquement une terre rare *stricto sensu*.

Dans les scénarios d'évolution de la demande en énergie présentés plus haut, on envisage d'ici à 2050 une construction d'éoliennes pour atteindre jusqu'à 14 GW/an pour les éoliennes en mer, et 48 GW/an pour les éoliennes à terre. La **Figure 17** traduit différents scénarios de consommation de néodyme associée à l'équipement en

Figure 17

Évolution de la demande en néodyme selon les scénarios de développement des filières technologiques. En bleu scénario maximal, en orange scénario moyen, en vert scénario bas, en rouge production possible en 2015, en bleu horizontal production actuelle.



éoliennes, moteurs électriques pour l'automobile et les autres applications existantes comme les disques durs ; l'accroissement par rapport à la production de 2015 est d'un facteur de 1,5 à presque 4. La demande actuelle, de 35 000 tonnes par an, pourrait, selon les scénarios, atteindre 120 000 tonnes par an. En fait, il y a lieu de distinguer entre les terres rares légères et les terres rares lourdes. Les premières sont beaucoup plus abon-

dantes dans les minerais naturels, mais ce sont les lourdes qui sont les plus demandées par l'industrie des nouvelles technologies. Le **Tableau 2** montre qu'en 2016 déjà, la demande en terres rares lourdes ne pourra pas être satisfaite alors que la demande en terres rares légères restera gérable. Le déficit en terres rares lourdes, et particulièrement en dysprosium, sera de 10 à 20 %, et son prix pourrait exploser à court terme.

Tableau 2

Prévisions de la demande et de la production de terres rares (et d'yttrium) en 2016, avec une très forte pression sur les terres rares lourdes.

Source : Kingsnorth dans *Éléments* 2012

TR légères	Oxydes de terre rare	2016	2016
		Demande	Production
TR lourdes	Cérium	60-70 kt	65-85 t
	Néodyme	25-30 kt	30-35 kt
	Europium	625-725 t	450-550 t
	Terbium	450-550 t	300-400 t
	Dysprosium	1,5-1,8 t	1,3-1,6 kt
	Yttrium	12-14 kt	9-11 kt

7 La notion de la criticité des éléments

Les économistes ont construit l'outil « **matrice de criticité** » pour quantifier les situations de pénurie en éléments chimiques et les gérer (Figure 18). On porte en ordonnée l'impact de la pénurie et en abscisse le risque d'approvisionnement. Ces matrices, outils d'aide à la décision pour les États, les entreprises, les acteurs économiques d'un métal, doivent être fréquemment remises à jour, car elles dépendent de nombreux facteurs, économiques, géostratégiques et humains.

La Figure 19 donne une matrice de criticité pour l'Europe, qui la revise tous les trois ans. Les terres rares sont dotées du risque d'approvisionnement maximum avec une importance économique positive, mais moyenne. La zone critique est marquée en bleu. Le diagramme établi aux États-Unis place également les terres

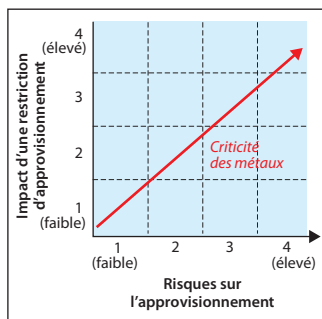


Figure 18

Matrice de criticité des éléments montrant la relation entre le risque d'approvisionnement (toutes raisons confondues) et son impact sur les économies (ou un secteur économique). Elle est définie au niveau des États, des régions ou des acteurs économiques.

rare parmi les risques les plus élevés (Figure 20). En particulier, en analysant le développement des énergies renouvelables comme indiqué sur la Figure 21 (à 5 ans et à 15 ans sur les diagrammes de gauche et de droite respectivement), on met bien en relief le caractère critique des terres rares (néodyme, dysprosium, terbium ainsi qu'yttrium) dont il faut disposer pour le développement des énergies renouvelables.

La matrice élaborée en France, sans surprise, affecte également le risque maximum et

Figure 19

Matrice de criticité pour l'Europe (révision théorique tous les trois ans).

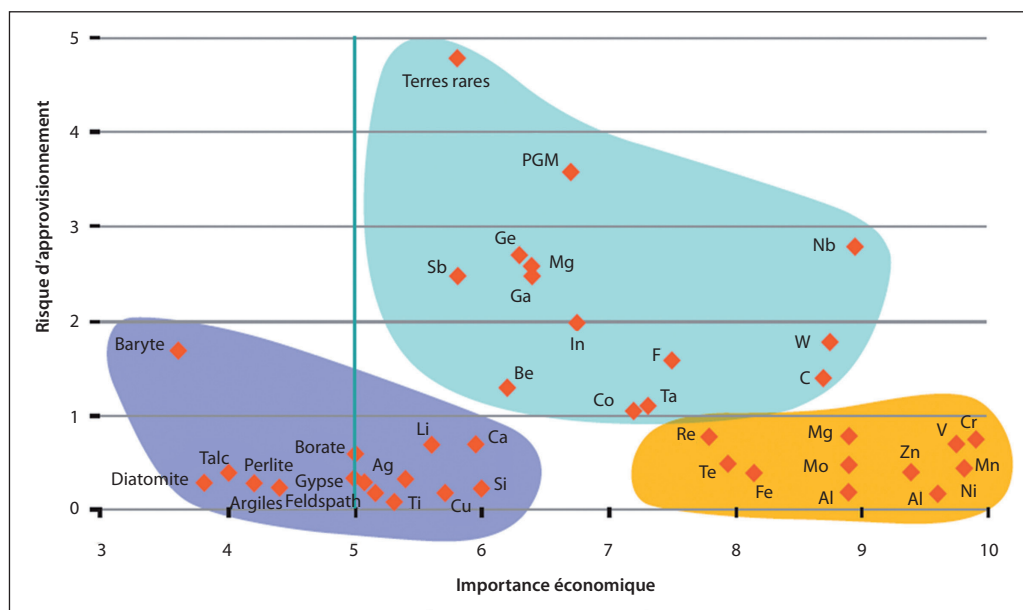


Figure 20

Matrice de criticité pour les États-Unis (REE : terres rares, « Rare Earth Elements »).

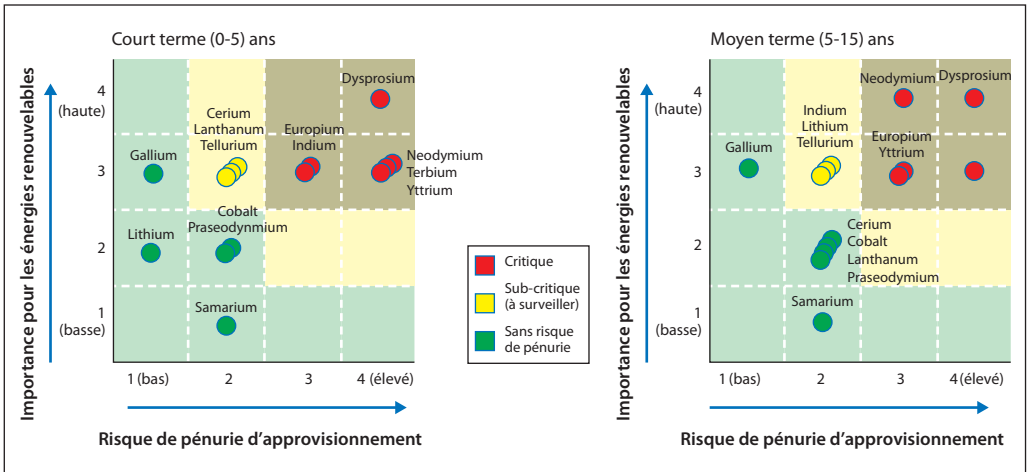
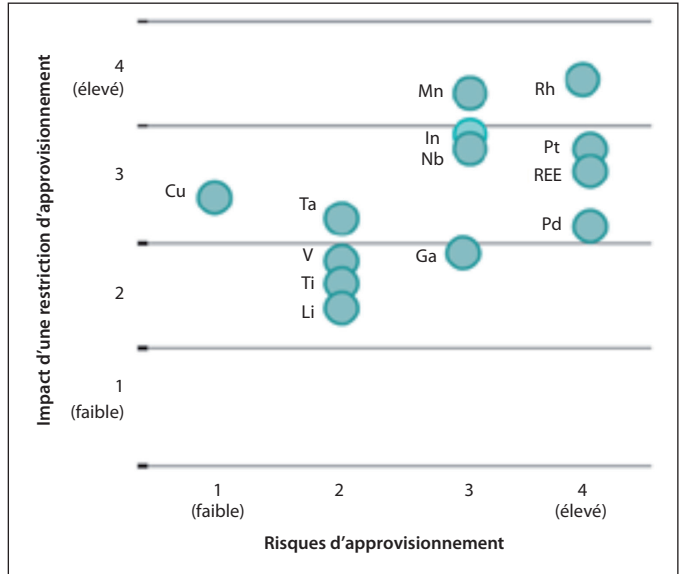


Figure 21

Matrice de criticité pour les énergies renouvelables.

impact maximum aux terres rares (Figure 22) ; elle considère aussi le graphite qui n'est pas un élément, mais un corps minéral.

Le tableau de Mendeleïev de la Figure 23 réunit les visions des États-Unis, de l'Europe et de la France. On note la mention de l'hélium par les États-Unis, qui le justifie par sa future utilisation dans la production d'énergie par fusion

contrôlée. L'Europe considère comme prioritaires toutes les terres rares et l'yttrium, plus le gadolinium, le germanium et l'indium qui entrent dans les panneaux solaires ainsi que les catalyseurs ruthénium, rhénium, platine et polonium qui sont des éléments critiques. La France a mentionné le carbone, non pas comme combustible, mais comme matériau graphite, le niobium et le tungstène ainsi

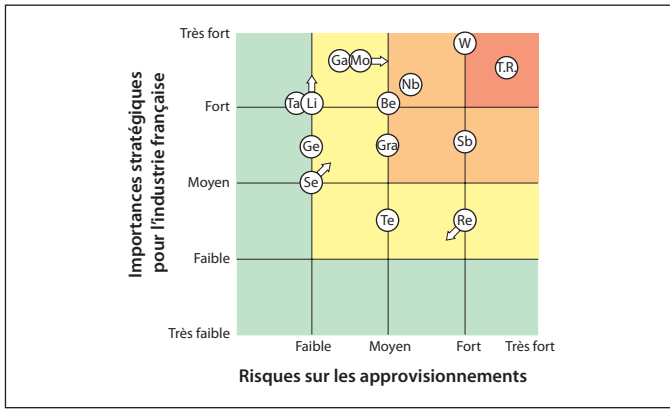


Figure 22
Matrice de criticité pour la France (T.R. : terres rares).

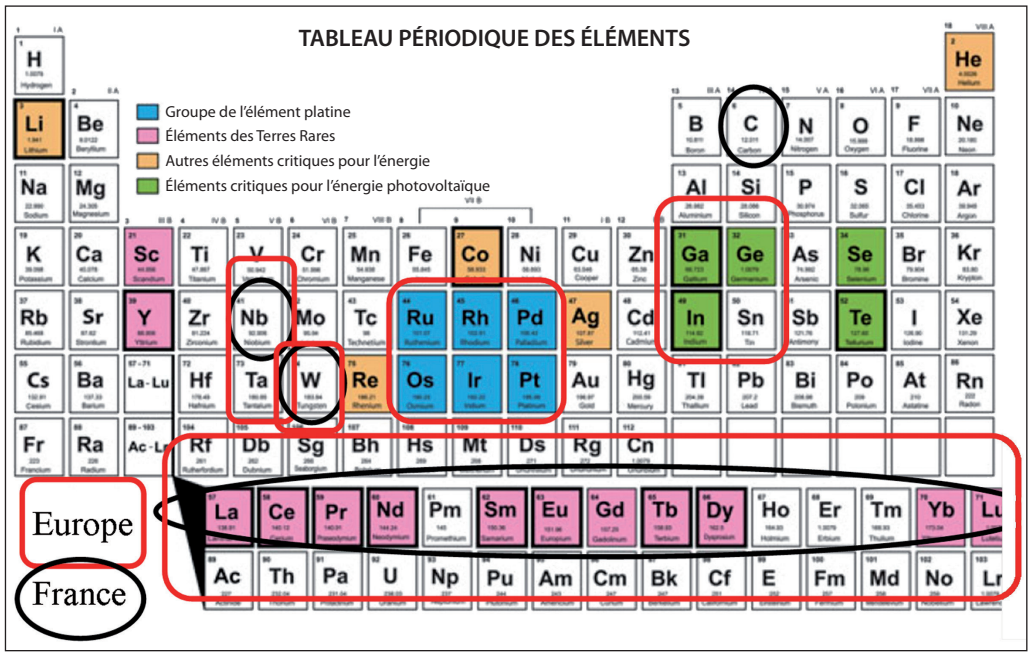


Figure 23
Éléments critiques pour l'énergie (energy-critical elements, ECEs) définis aux États-Unis (APS + MRS + DOE) représentés dans le tableau périodique des éléments, comparés aux visions européennes et françaises.

que toutes les terres rares. L'ensemble des analyses montre l'importance de la contrainte sur les terres rares pour le futur, même proche.

8 Répondre au défi du développement des énergies renouvelables ?

Comment répondre au défi du développement des énergies renouvelables si les matières premières nécessaires sont

trop rares ? Répondre à cet enjeu demande une vision intégrée du cycle des matières premières pour qu'on puisse mettre en place leur gestion durable. Il faut d'abord mieux connaître le cycle des matières (Figure 24) : extraction de la mine puis cycle de production et d'usage, enfin recyclage et prise en compte d'une perte de matière, d'énergie et les diverses émissions qui sont perdues. Cette vision

Figure 24

Une vision intégrée du cycle des matières premières pour leur gestion durable.

Source : P. Christmann, BRGM

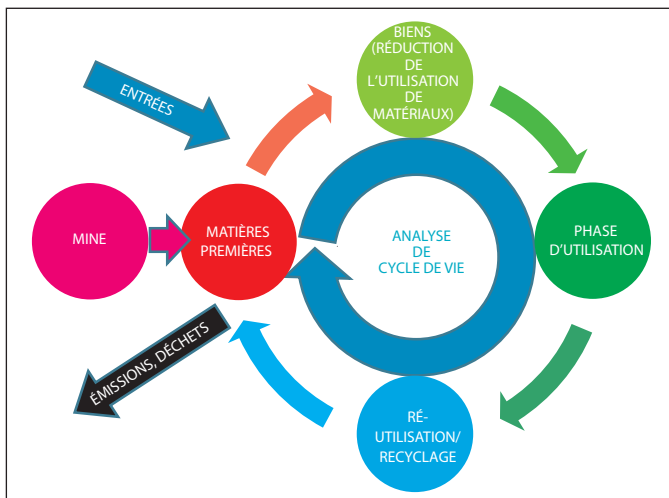
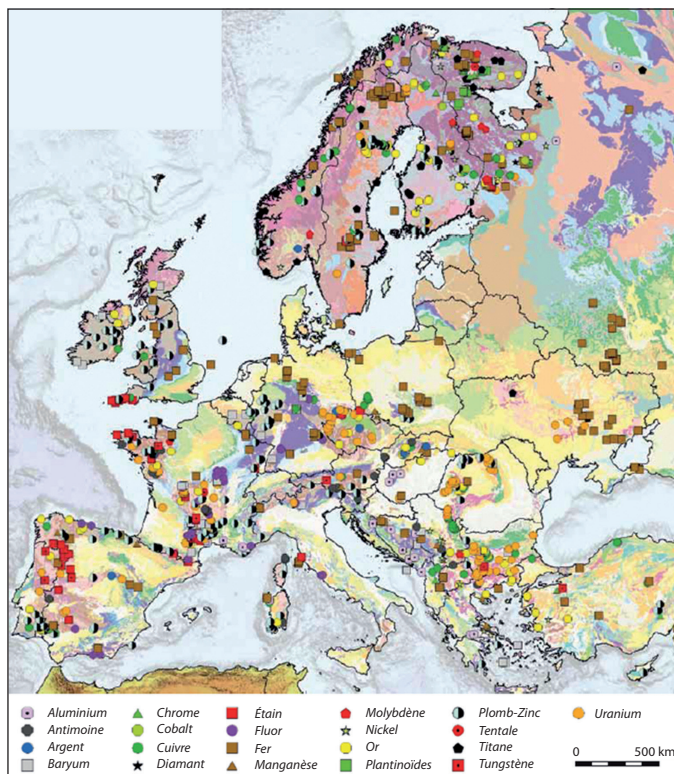


Figure 25

Carte métallogénique de l'Europe basée sur une synthèse géologique originale au 1/1 500 000 et localisant les principaux gisements européens.

Source : BRGM, Ressources minérales. Contribution au Sommet de la Terre 2012. n° 15



demande le déploiement d'un important effort de recherche, qu'il convient de mettre progressivement en place.

La carte des ressources minérales de l'Europe (Figure 25) a été établie il y a plus de quarante ans. Construite sur les métaux de base, elle ne contient aucune donnée sur

les terres rares. Il faut donc reprendre l'exploration sur nos territoires et redéfinir les technologies d'exploitation. Mais il faut aussi comprendre et réduire les impacts environnementaux associés à l'exploration et à l'exploitation (comprendre les conséquences de l'extraction de tel ou tel élément).

Mais c'est peut-être sur les ressources minérales des fonds marins que notre ignorance est la plus grande. Des ressources minérales considérables mais non répertoriées existent sur les rides médio-océaniques. Explorer les fonds océaniques, maîtriser les technologies et comprendre les impacts environnementaux – peut-être encore plus critiques que sur les continents – est indispensable.

La Figure 26 montre quelques exemples de telles ressources, sulfure ou nodules polymétalliques, présentes dans les fonds marins². La

2. Voir aussi *La chimie et la mer, ensemble au service de l'homme*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, EDP Sciences, 2009 et *La chimie et la nature*, chapitre de B. Goffé, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2012.

Figure 27 donne la carte des licences actuellement concédées par l'Autorité internationale des fonds marins (International Seabed Authority, ISA), qui distribue des licences d'exploration sur les eaux internationales. La France a pris en 2012 une licence sur la ride Atlantique.

L'Europe possède près de 20 % (dont une moitié française) des « zones économiques exclusives » (ZEE) (Figure 28) et ce sont toutes des territoires situés au bord

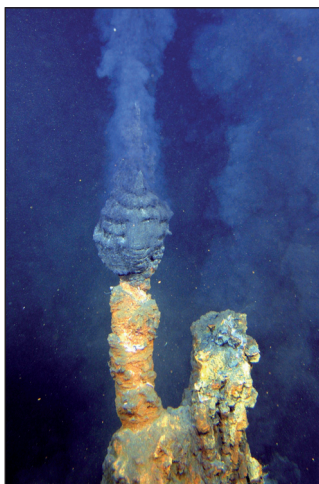


Figure 26

Minéralisations dans les grands fonds.

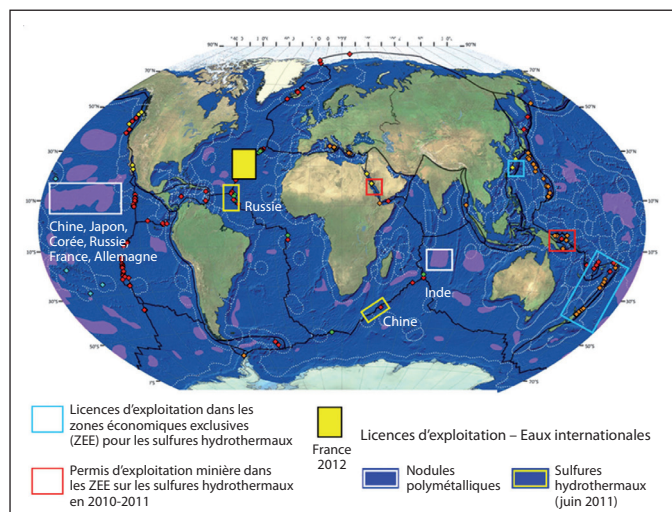


Figure 27

Les enjeux de la ressource primaire.

Source : Ifremer

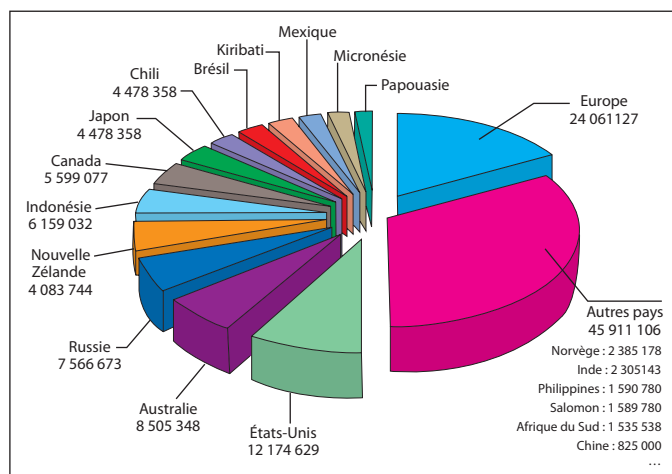


Figure 28

Parts des pays sur les zones économiques exclusives (ZEE) en 2012. Total des ZEE : 138 millions de km² sur 361 km² d'océan.

Source : Ifremer

du plateau continental, ce qui assure un droit d'usage privé. Elle se doit donc d'être vigilante sur ces questions qui concernent l'ensemble des ressources métalliques, mais plus particulièrement les terres rares.

La **Figure 29** donne l'abondance des terres rares comparée à celle d'éléments plus classiques. En fait, elles sont presque aussi abondantes que le cuivre et le nickel ; il y a un peu moins de terres rares lourdes que légères et moins d'euporium ou de samarium que de plomb, mais pas tellement moins. Au moment où les tensions sur les terres rares sont apparues, l'USGS (United States Geological Survey), le service géologique américain, a réévalué, à partir des données existantes, les pays qui pouvaient produire des terres rares : la Chine possède un tiers des réserves alors qu'elle produit 100 % des terres rares ; les États autour de la Russie (CEI) ont 22 % des réserves, les États-Unis 15 %, l'Australie 6 %,

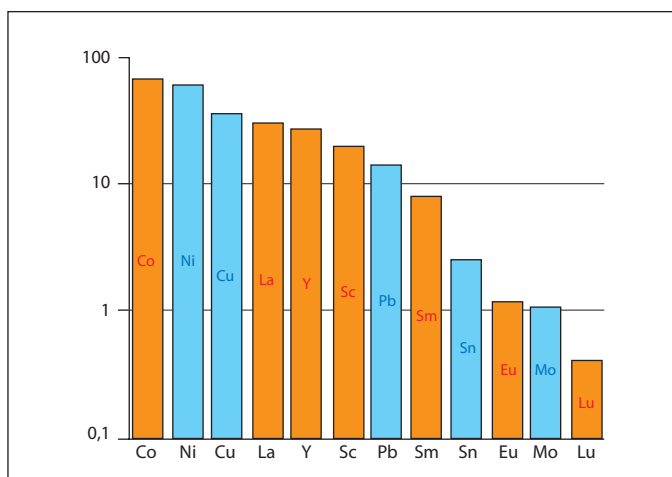
l'Inde 1 %. D'après cette évaluation, l'Europe n'en aurait pas ! Cela n'a pas de sens géologique et n'est qu'un signe que son territoire n'a pas été sérieusement évalué sous ce rapport (**Figure 30**).

La **Figure 31** illustre la répartition de l'exploration et des projets d'exploitation des terres rares actuellement en route au monde. De nombreux projets apparaissent aux États-Unis, au Canada, en Australie, en Afrique du Sud et évidemment en Chine, le pays producteur majeur. En fait, c'est là que les usines tournent ; ailleurs, il n'y a pas d'exploitation ou très peu. On trouve en Europe deux petites exploitations, une en Finlande, l'autre en Suède et aucune recherche en cours : l'Europe est absolument délaissée dans l'exploitation mondiale des terres rares, et ce n'est pour aucune raison objective – certainement pour aucune raison géologique.

L'histoire de la Terre rend en effet peu probable une singularité européenne sur cette question. Il y a 245 millions d'années, tous les continents étaient agglomérés en un continent unique, la Pangée (**Figure 32**). Ce qui devait devenir l'Eurasie, ou l'Amérique, ou l'Afrique, était assemblé. Il n'y a donc pas de raison géologique pour que de grosses différences existent. La raison de l'absence de l'Europe dans les ressources en terres rares est plutôt à chercher dans le sous-investissement en recherche sur les ressources minérales qui y règne depuis plus de trente ans. Les

Figure 29

Abondance relative de terres rares dans la croûte terrestre (en %). Des réserves importantes et bien réparties... sauf en Europe !



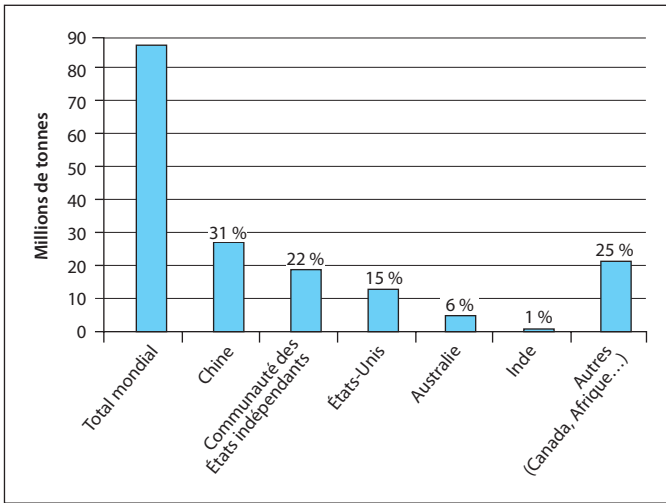


Figure 30

Répartition des réserves mondiales de terres rares réévaluées en 2007 par l'USGS.

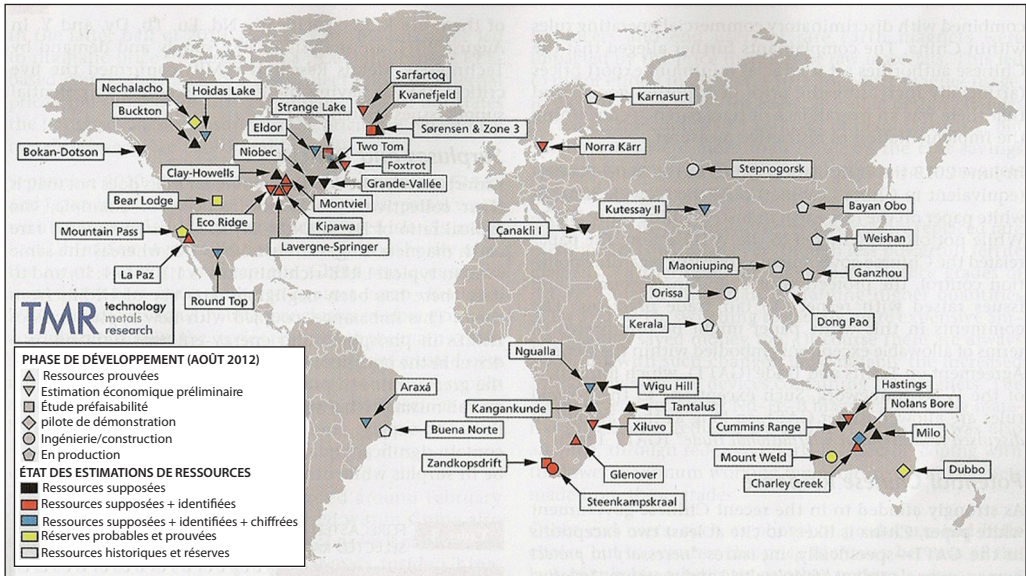


Figure 31

Carte des explorations et projets d'exploitation de terres rares en cours.

Source : TMR (www.techmetalsresearch.com/) dans *Éléments* 2012

raisons sont multiples, mais dans le cas des terres rares la question de l'impact environnemental est certainement un facteur aggravant.

Les préoccupations sur la qualité de l'environnement sont en effet apparues au cours des toutes dernières décennies. La **Figure 33** retrace l'origine de la production mondiale depuis 1955.

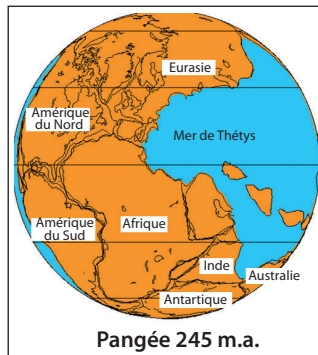
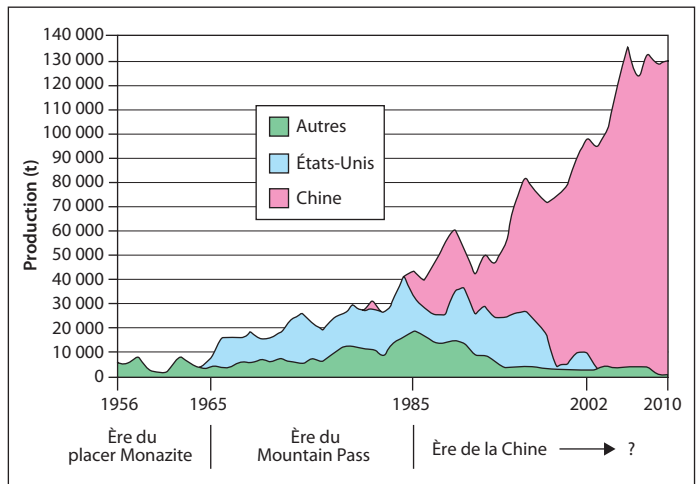


Figure 32

La géologie de l'Europe commune avec les celles des continents les plus proches (Afrique du Nord-Ouest, Amérique du Nord) n'en diffère pas fondamentalement sur les ressources en matières premières. La méconnaissance du sous-sol européen est une conséquence d'un sous-investissement dans la recherche sur les matières premières depuis trente ans.

Figure 33

Production mondiale de terres rares depuis 1955. Le monopole de la Chine résulte de la possession sur son territoire d'une ressource en terres rares de qualité exceptionnelle, mais aussi de la non-consideration des atteintes à l'environnement lors de l'exploitation et du traitement du minerai.



Les États-Unis étaient le principal producteur jusque vers la fin des années 1990, puis c'est la Chine qui a pris le relais, certainement parce que ses ressources étaient importantes (30 %) mais aussi parce qu'elle n'avait pas à considérer les atteintes à l'environnement de l'extraction et de l'exploitation des terres rares très souvent géologiquement associées avec les éléments actinides (Figure 34).

Le deuxième enjeu de la recherche concerne les « ressources secondaires » :

les déchets. Le tableau de Mendeleïev de la Figure 35A montre les taux de recyclage dans les déchets de production de métaux, donc au niveau de l'usine. En bleu, il indique ce qui est recyclé à plus de 50 %, en vert entre 25 et 50 %, et en rouge à moins de 1 % – et il s'agit en particulier des terres rares ! La Figure 35B donne le taux de recyclage dans les déchets en fin de vie des produits. Davantage d'éléments sont recyclés à plus de 50 % (le fer, le nickel, le chrome, mais aussi les catalyseurs,

Figure 34

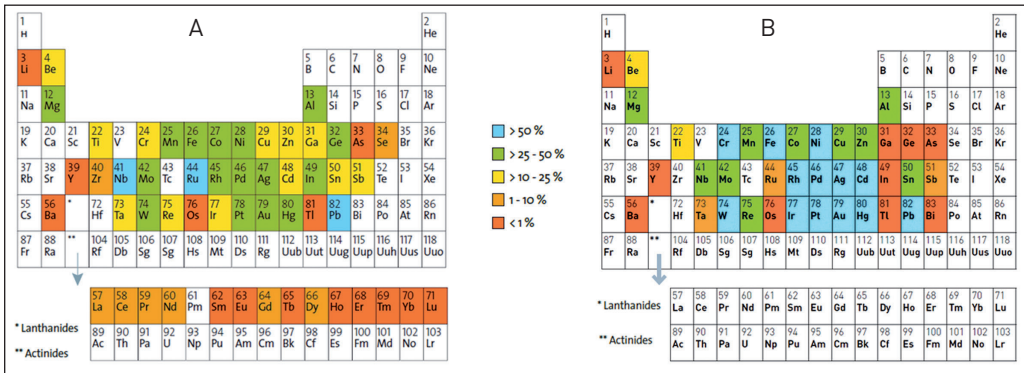
Actinides et lanthanides sont quasiment toujours associés dans la nature (carbonates, phosphates, silicates).

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

http://www.periodic.com/fr/

1	MAISE ATOMIQUE RELATIVE (A)																18																			
1	H																	He																		
2	Li	Be	GROUPE CAS										B	C	N	O	F	Ne																		
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar	GROUPE CAS										K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
4	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe																		
5	Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																		
6	Fr	Ra	Ac-Lr	Rf	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																	
7																																				

Copyright © 2007 by Elsevier

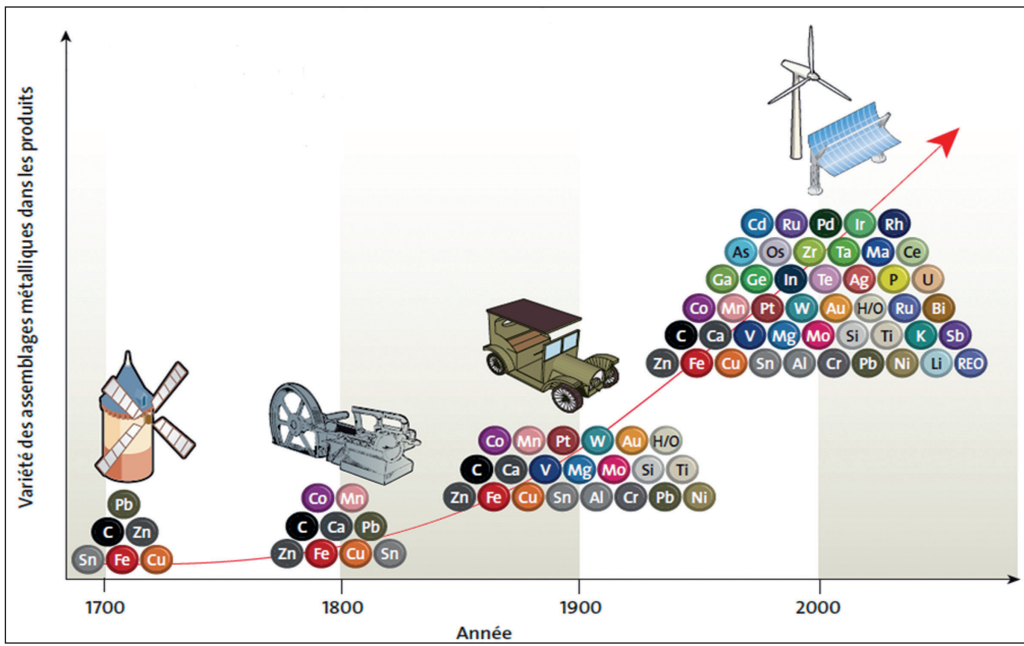


platine, etc.) ; quelques-uns à 25-50 %, mais encore beaucoup à moins de 1 %. Sur les terres rares, on n'a aucune donnée ; il n'y a aucun recyclage en fin de vie, simplement des projets qui se mettent en place. Sur ces sujets-là évidemment, il faut appeler la recherche, accroître le recyclage, retravailler les résidus, développer les procédés de traitement bio et géo-inspirés.

L'évolution technologique conduit à une difficulté supplémentaire sur le recyclage, provenant de la diversité et de la dilution des éléments utilisés qui sont en croissance constante, comme l'illustre la **Figure 36**. Au XVIII^e siècle, on n'utilisait que six éléments pour faire tourner toute l'industrie mondiale (en particulier pour l'énergie) et, en 2000, il y en a presque cinquante en particulier pour faire tourner

Figure 35
A. Déchets de production.
B. Déchets de fin de vie.
 Source : UNEP IRP 2011

Figure 36
 Augmentation de la complexité des assemblages métalliques dans des produits génériques.



les énergies renouvelables. Certains de ces éléments ne sont qu'en très faible quantité et leur récupération pose donc des difficultés chimiques considérables.

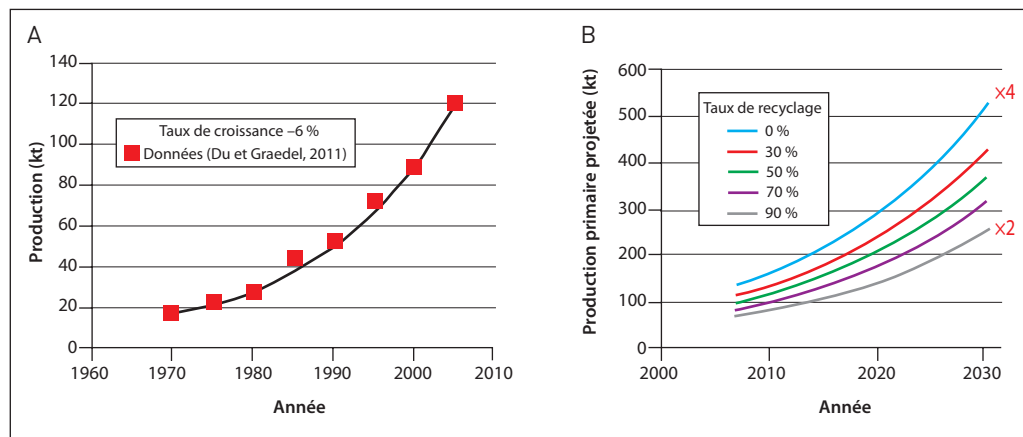
Aujourd'hui, le recyclage apparaît comme nécessaire pour pallier l'insuffisance des ressources minières. La **Figure 37A** montre le taux de croissance de la production des terres rares dans le monde de 1970 à 2000, un taux moyen de 6 %. Une projection est indiquée en **Figure 37B** : actuellement, on est à 0 %. Même à 90 % de recyclage, il faut multiplier par deux les besoins en matière première ; les accès à la matière première venant de la mine resteraient donc importants même si les taux de recyclage étaient parfaits. Un enjeu scientifique et technologique serait de maîtriser les impacts environnementaux à l'échelle planétaire. La terre rare qui sert à faire tourner des éoliennes en Europe est exploitée en Chine et son impact environnemental est donc en Chine. Il a été proposé de développer des technologies propres puis de

promouvoir et de développer la notion d'observatoire pour suivre le développement d'une technologie sur l'entièreté de son cycle de vie, afin de fournir aux populations, aux politiques et aux industriels des données fiables sur les impacts d'une exploitation quelconque.

Ceci conduit au concept de « mines vertes » développé par les Européens ; ce sont des mines à grande profondeur, invisibles, où les impacts environnementaux sont minimisés (**Figure 38**). Maîtriser les gouvernances et favoriser les implications du citoyen sont promus au rang d'un enjeu majeur pour reprendre l'exploitation d'une mine, et même simplement faire tourner des usines de recyclage. Dans cet esprit, la **Figure 39**, du Bureau de recherches géologiques et minière (BRGM), cherche à équilibrer une vision négative (déstructuration économique, pollution, déstructuration du tissu social, génération de conflits, etc.) de l'impact de l'industrie minière avec une vision positive (impacts économiques et environnementaux réduits, source de travail).

Figure 37

A. Croissance de la production des éléments terres rares entre 1970 et 2007. **B.** Croissance projetée de la production primaire des éléments terres rares en fonction de différents taux de recyclage pour un taux de croissance global de 6 %.



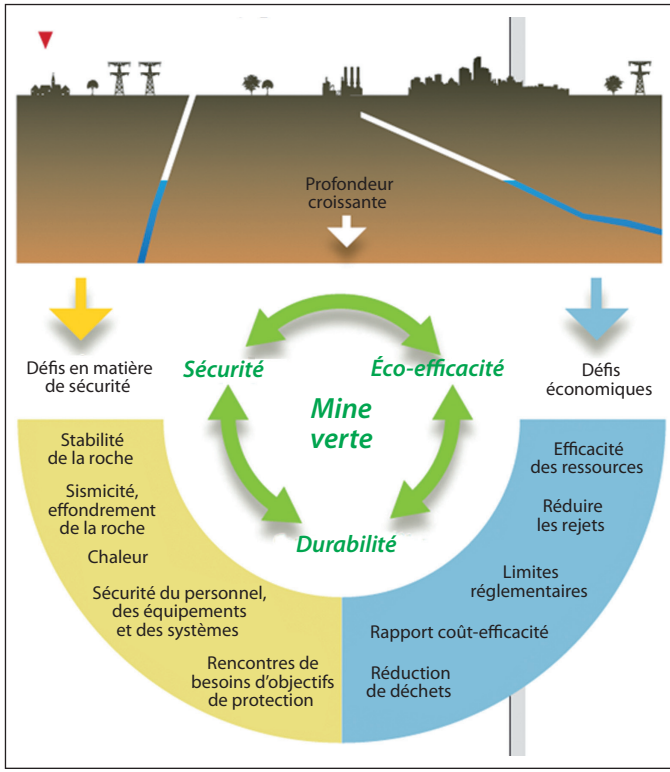


Figure 38

La mine verte pour maîtriser et comprendre les impacts environnementaux à l'échelle locale et globale : prévoir et mesurer les impacts environnementaux proches ou lointains du développement d'une technologie ; développer les technologies propres ; promouvoir et développer la notion d'observatoire (établir l'état zéro - flore, faune, géochimie, eau, paysage) ; suivre les activités minières en développant des bases de données certifiées et accessibles ; coordonner la recherche sur l'impact environnemental de la mine (santé, ecotoxicologie, cycle de vie, remédiation).

Source : www.i2mine.eu/content/open_access/introduction

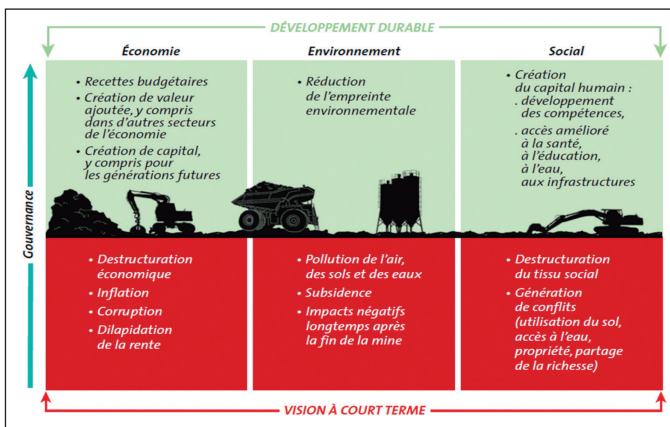


Figure 39

Impacts positifs (zone grise) ou négatifs (zone rouge) de l'industrie minière, selon le degré de qualité de la gouvernance.

Repenser d'autres solutions pour la transition énergétique

L'incertitude associée à la disponibilité des terres rares, éléments indispensables au développement des énergies renouvelables envisagé aujourd'hui, conduit à des questions fondamentales. Les solutions envisagées actuellement sont-elles réalistes ? Une grande idée serait de substituer les éléments rares par des éléments plus communs ou de modifier les procédés et les usages.

En fait, toutes nos intentions de changement dans nos besoins en énergie visent à remplacer le carbone fossile par les métaux ; ils permettent dans le court terme la conversion de l'énergie solaire que le carbone fossile a réussi sur le long terme. Ces métaux particuliers sur lesquels reposent nos projets actuels ont une abondance limitée, une distribution inégale, des impacts environnementaux parfois insupportables, et leur recyclage est imparfait. Justifient-ils que l'on reconsidère l'utilisation du carbone, l'élément le plus abondant à la surface de la Terre, celui qui a les plus grandes densités énergétiques et que l'on sait mieux recycler ? On peut se poser finalement la question de revenir sur le carbone. Si la nature l'a utilisé, ce n'est pas par hasard. Ne pourrait-on pas maîtriser à l'échelle du temps humain – quelques dizaines d'années – le cycle du carbone à travers la biomasse, la valorisation du CO_2 ? Transformer le CO_2 en hydrocarbures déplace le problème vers la fabrication d'hydrogène nécessaire pour faire un hydrocarbure à partir du CO_2 . La question se pose d'accéder ou de fabriquer l'hydrogène par électrolyse, ou de transformer directement l'énergie solaire par la photosynthèse assistée. Ce sont ces questions, dans une vision de substitution, qu'il faut se poser.