

## Séminaire : les ressources non énergétiques, un frein aux transitions énergétiques ?

*Il y a encore quelques années, beaucoup s'interrogeaient sur les conséquences d'une raréfaction du pétrole : on sait aujourd'hui que ce sont plutôt les émissions de carbone associées à cette énergie qui limiteront son usage. Les transitions dans lesquelles le monde s'est engagé pourraient en revanche se heurter à l'insuffisante disponibilité, dans des conditions économiques, environnementales, sociales et géopolitiques satisfaisantes, de certaines ressources non énergétiques : parmi les premières identifiées, les terres rares, présentes dans certains produits-phare des transitions énergétique et numérique. Le séminaire, organisé par le Conseil Français de l'Énergie le 23 janvier 2019, s'est attaché à préciser les besoins associés aux technologies innovantes, les enjeux en termes de substitution et de recyclage ainsi que les conséquences sur les marchés; il s'est ensuite interrogé sur la dimension géopolitique avant de tenter de répondre à la question : «Les ressources stratégiques seront-elles un frein aux transitions énergétiques?». Sans prétendre résumer en quelques phrases le séminaire, les ressources non énergétiques ne constitueront pas un goulot d'étranglement pour les transitions énergétiques si, dès aujourd'hui, des décisions pertinentes sont prises pour favoriser les substitutions et le recyclage et assurer un accès durable aux ressources primaires.*

### Discours d'ouverture

*Michèle Rousseau, Présidente-directrice générale, BRGM*

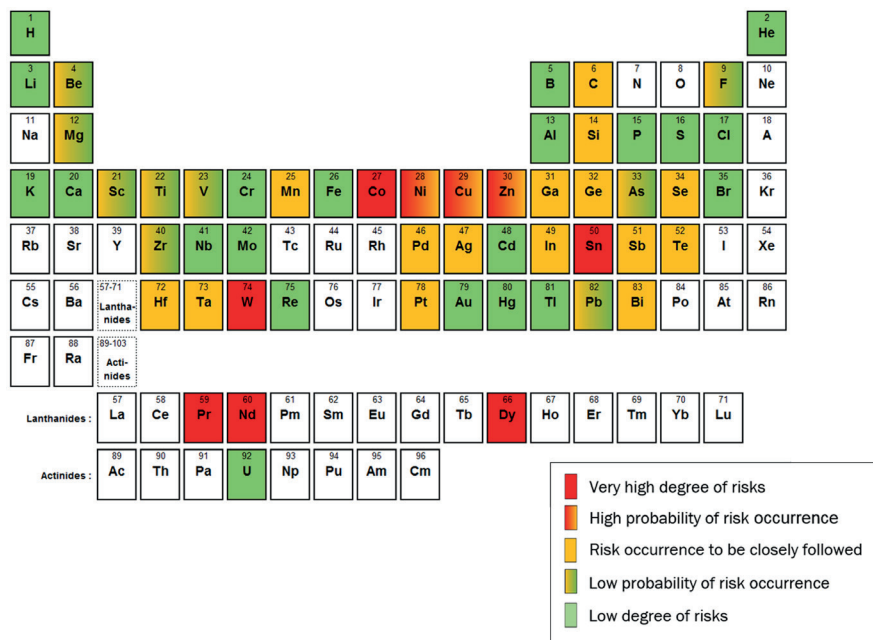
Michèle Rousseau a rappelé par quelques ordres de grandeur l'importance des métaux dans les transitions aujourd'hui — l'énergie n'est en effet pas le seul secteur concerné. Les besoins concernent des métaux rares, mais aussi des matériaux plus traditionnels comme

le béton (donc le sable), l'acier ou le cuivre. La criticité d'un métal est fonction de nombreux paramètres : demande, réserve, production, géopolitique, substitution, recyclage...

Michèle Rousseau a insisté sur l'importance du recyclage qui est encore très faible pour les matériaux que l'on retrouve notamment dans les objets high-tech : tungstène, terres rares, germanium, indium, scandium, tantale, lithium. Le cadre conceptuel de l'économie circulaire est très utile pour décrire ce système complexe caractérisé par une consommation croissante, des objets à durée de vie très variable, des usages parfois dispersifs, une recyclabilité souvent limitée, des investissements lourds, tant pour la collecte que pour le recyclage. Il en résulte que, même en poussant très loin la contribution du recyclage, il restera

---

La rédaction de cette note s'est appuyée sur les résumés rédigés par quatre membres du FEL-France (communauté de jeunes professionnels de l'énergie au carrefour des énergies, des technologies, des acteurs et des métiers initiée par le Conseil Français de l'Énergie) : Camille Cany (ingénieur chercheur), Claire Charmette (analyste financement et trésorerie), Sylvain Frédéric (expert énergie) et Bianka Shoai-Tehrani (ingénieur chargée d'études). Le Conseil Français de l'Énergie les remercie chaleureusement pour leur travail.



indispensable de s'assurer un approvisionnement en ressources primaires.

L'exploration se situe principalement dans des pays développés et stables comme le Canada ou l'Australie, ce qui pose la question de la place de l'exploration et de l'exploitation minières des métaux stratégiques en Europe, et particulièrement en France : les groupes français sont des acteurs internationaux de second ordre par rapport aux grandes multinationales comme Rio Tinto ou BHP Billiton. Certains pays européens, notamment les pays scandinaves, se sont déjà engagés sur cette voie.

La compétition internationale pour les prises de position stratégiques est dominée par la Chine qui développe rapidement de puissantes majors minières très actives à travers le monde et pourrait se trouver en situation de quasi-monopole dans la production industrielle de nouvelles technologies.

La Chine fournit aujourd'hui 95 % de la demande mondiale de terres rares (pots catalytiques, aimants permanents), 87 % de l'antimoine (semi-conducteurs), 84 % du tungstène (missiles), 79 % du germanium (fibre optique).

Pour d'autres ressources, la situation est très différente : 36 % du cobalt (piles à combustible) sont produits en République démocratique du Congo, 77 % du platine (catalyse) en Afrique du Sud et 60 % du lithium (batteries) au Chili. La domination de la Chine est illustrée par la « bulle » provoquée en 2010-2011 sur le marché des terres rares par sa politique de quotas à l'exportation : les mouvements de prix qui en ont résulté ont éliminé les « petits » producteurs hors de Chine et renforcé sa position dominante.

En conclusion, Michèle Rousseau a insisté sur la nécessité et l'urgence d'organiser les marchés, d'accroître les efforts de recherche et développement et de promouvoir les substitutions et le recyclage, dans une perspective durable. La France dispose de moyens d'analyse (BRGM, CNRS...) suffisants, mais pas d'action organisée de l'État faisant suite aux analyses du BRGM.

### Session 1. Besoins associés aux technologies innovantes

#### Les éléments d'analyse de la dépendance aux matières minérales de la transition énergétique

*Alain Geldron, Expert national matières premières, ADEME*

Un premier constat historique peut être réalisé sur le nombre de métaux utilisés par l'homme : de moins d'une dizaine de métaux jusqu'en 1800, on est passé à plus d'une cinquantaine aujourd'hui. Pour un objet technologique, cette évolution se caractérise par une plus grande diversité des métaux et par une quantité de métaux utilisés plus importante. Par exemple, un smartphone classique aujourd'hui contient plus de 50 à 60 éléments du tableau périodique de Mendeleïev. Cette utilisation des métaux pose la question de la dépendance des procédés liés à la transition énergétique : quels sont aujourd'hui les principaux métaux utilisés dans les différentes technologies de la transition énergétique ? La construction de panneaux photovoltaïques utilise du silicium (7,4 Mt), de l'argent (2,5 kt), de l'indium (720 t), du tellure (420 t) et du gallium (315 t) ; pour celle des éoliennes, ce sont plutôt des terres rares (130 kt) (les chiffres entre parenthèses renvoient aux consommations annuelles). La mobilité électrique est fortement consommatrice de cuivre et de terres rares ; les batteries nécessitent du lithium (43 kt), du graphite (1,2 Mt) et du cobalt (110 kt). On pourrait encore citer le platine pour les piles à combustible, le ruthénium pour les biocarburants ou le tantale pour l'électronique.

Par ailleurs, le photovoltaïque et l'éolien, comme le nucléaire ou l'hydroélectricité, sont aussi fortement consommateurs de matériaux structurels comme le cuivre (20 Mt), l'acier (1,7 Gt) et le ciment (4 Gt).

De cette dépendance, on déduit la notion de matières premières stratégiques, c'est-à-dire celles qui sont indispensables à une industrie donnée. Ces matières sont plus ou

moins abondantes dans la croûte terrestre. Les éléments dits «abondants» (comme par exemple le silicium ou le titane) sont au-dessus de 0,1 % de concentration. Les éléments dits «rares» sont en dessous de 0,1 %, comme le cuivre, le cobalt ou le tungstène. Enfin, les éléments dits «très rares» sont en dessous de 0,0001 % comme le platine, l'or ou l'indium.

Un autre élément à prendre en compte est la notion de criticité. Il y a de multiples facteurs de criticité : la disponibilité géologique, le risque politique, la concentration de la production, le caractère de «sous-produit» (exploitation d'une mine de cuivre pour avoir du cobalt par exemple), le potentiel de recyclage, les possibilités de substitution, la croissance de la demande, le temps de développement de la production et enfin l'acceptabilité sociale et environnementale.

L'ADEME a déjà développé des visions de la transition énergétique à horizon 2035 et 2050. L'objectif est maintenant d'évaluer la dépendance de la transition énergétique à certains matériaux dits stratégiques. Le projet SURFER (ADEME, BRGM, ISTerre) vise à cette évaluation et prévoit :

- Une base de données de «l'intensité matière par technologie» ;
- Un modèle dynamique comprenant un scénario de recyclage ;
- Une modélisation du cycle de vie du matériau ;
- Un traitement des données externes comme l'organisation des marchés, l'approvisionnement et la criticité.

#### L'impact des matières premières sensibles sur les groupes motopulseurs électrifiés du groupe PSA

*Bernard Sabut, Responsable partenariats académiques et Expert batterie, Groupe PSA*

Le contexte actuel de notre société est caractérisé par des évolutions majeures et cruciales avec la transition énergétique, la mondialisation, la densification des villes, l'augmentation de la population et la relation des hommes

aux objets. Toutes ces évolutions impactent fortement le secteur automobile. Il est ainsi prévu que le secteur automobile changera davantage dans les dix ans à venir que durant les trente dernières années. C'est pourquoi le groupe PSA réalise notamment une veille et des études sur les matériaux stratégiques nécessaires à la construction de ses véhicules.

Un autre élément guide le choix des constructeurs : le respect des contraintes environnementales. À l'horizon 2020, en Europe, il ne faudra pas émettre plus de 95 gCO<sub>2</sub>/km en moyenne (avec une cible encore plus ambitieuse en 2025 d'environ 80 gCO<sub>2</sub>/km). L'électrification des chaînes de traction est indispensable pour arriver à cette valeur. En effet, l'évolution des chaînes de traction thermique vers une meilleure efficacité énergétique ne suffira pas pour respecter la contrainte environnementale.

Ainsi, en 2025, la stratégie du groupe PSA est de proposer pour tous les nouveaux véhicules une solution électrifiée. Cette stratégie se décline en deux chaînes de traction : une chaîne de traction hybride rechargeable et une chaîne de traction purement électrique.

Plusieurs matériaux d'une chaîne de traction électrique peuvent être qualifiés de «sensibles». Une chaîne de traction électrique est constituée d'une batterie, d'une machine électrique, de systèmes électroniques de puissance, de réducteurs, de câbles et de lois de contrôle-commande. Dans la suite de l'exposé, ne seront abordées que la batterie et la machine électrique.

Dans une batterie, il y a des matériaux non électrochimiques (aluminium, cuivre, polymères) et des matériaux «actifs» électrochimiques (électrode, électrolyse, séparateur). Parmi ces matériaux, le cuivre et les matériaux constituant les électrodes (en particulier le cobalt) sont considérés comme des matériaux sensibles. La stratégie du groupe PSA a pour objectif d'étudier comment, par exemple, remplacer ou réduire l'utilisation du cobalt dans les électrodes.

Dans une machine électrique, il y a des matériaux électromagnétiques (terres rares, cuivre) et des matériaux non électromagnétiques (aluminium, acier). Les terres rares et le cuivre sont considérés comme des matériaux sensibles. On trouve en effet 20 kg de cuivre dans un véhicule à moteur à combustion interne, 40 kg dans un véhicule électrique hybride et 80 kg dans un véhicule électrique. Le groupe PSA réfléchit donc à remplacer certains aimants permanents par d'autres solutions tout aussi performantes.

### **Les enjeux environnementaux de l'industrie automobile : notre stratégie**

*Catherine Girard, Expert énergie et matières premières, RENAULT*

Comment un constructeur automobile peut-il assurer sa transition énergétique dans des conditions soutenables? Il faut aujourd'hui gérer trois enjeux principaux : le climat, la santé et les ressources. Ces enjeux se traduisent par des attentes spécifiques de la part des clients, des pouvoirs publics et des organisations non gouvernementales. Le cadre institutionnel est international (Accord de Kyoto, Accord de Paris), européen, mais aussi local. Tous ces éléments incitent le groupe Renault à agir sur l'ensemble de la chaîne de valeur du véhicule pour avoir une vision d'ensemble.

Les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur des véhicules légers devraient diminuer de 32 % entre 2000 et 2050 d'après l'Agence internationale de l'énergie (AIE) alors que dans le même temps le parc automobile aura été multiplié par 3,5 du fait de la croissance des marchés en développement. Pour atteindre cet objectif, des actions hors du champ d'action du groupe Renault comme l'optimisation des trajets et la décarbonation du mix électrique seront indispensables pour diminuer les émissions de CO<sub>2</sub>. Dans les missions du groupe Renault, on peut citer l'amélioration de l'efficacité énergétique des moteurs thermiques, l'électrification, les innovations hors cycle ainsi que la production et le recyclage des véhicules.

## Séminaire : les ressources non énergétiques, un frein aux transitions énergétiques ?

Concernant les ressources en matières premières, les constructeurs sont confrontés à trois problématiques : la disponibilité de la ressource sur le long terme (par exemple le cuivre), les conditions sociales et environnementales de l'extraction de cette ressource et enfin la volatilité des prix.

La première piste d'action est «réduire ou substituer». Pour répondre au risque d'indisponibilité de certains matériaux comme les terres rares, le groupe Renault a choisi de ne pas utiliser ces terres rares dans les moteurs électriques, en ayant recouru par exemple à d'autres technologies que les aimants permanents.

Pour le cobalt, dont la demande est susceptible de créer des tensions sur le marché, l'Alliance Renault-Nissan-Mitsubishi (via une société de capital-risque) a pris des parts de capital dans une *start-up* américaine, *Ionic material*, développant de nouveaux types de batteries utilisant moins ou pas de cobalt.

La deuxième piste d'action est l'économie circulaire. Renault est membre fondateur de la Fondation Ellen MacArthur, dont la mission est d'accélérer la transition vers une économie circulaire. Le groupe a décidé de développer des liens capitalistes avec différentes sociétés autour de l'économie circulaire : investissements à l'usine de Choisy pour «remanufacturer» les moteurs, parts de capital dans *Boone comenor metalimpex* qui recycle les déchets métalliques des véhicules, investissements au sein du réseau Indra pour récupérer les matières/pièces des véhicules hors d'usage. Le tout est géré par l'entité GAIA qui réalise la gestion de l'approvisionnement en matières premières, secondaires et en pièces «remanufacturées».

Cette économie globale permet de réduire la demande en ressources mais aussi d'améliorer les analyses de cycle de vie sur la production et le recyclage des véhicules. Renault intègre sur ses véhicules 33 % de matières recyclées.

La troisième piste d'action est le développement de nouveaux usages. Un véhicule en Europe est à 92 % du temps garé dans un parking. Cela interroge sur l'efficacité de l'utilisation des ressources mais surtout sur les usages. Ainsi, le groupe réfléchit et propose de nouveaux services comme par exemple la mobilité partagée.

### Session 2. Impact sur les ressources et les marchés de minéraux

#### Prix, recyclage et substitution : les mécanismes de rappel dans la théorie économique

*Dominique Finon, Directeur de recherche, CNRS-CIRED*

Depuis quelques années, le marché des matières premières connaît une demande croissante (emballement en 2010 pour les métaux de base et 2011 pour les terres rares). Cette forte demande provient de l'utilisation accrue des métaux dans les produits de consommation. Cela a conduit à soulever les questions de dépendance pour les pays importateurs et à revenir aux questions posées dans les années 1970 par le rapport du Club de Rome *Limits to Growth*.

Dans la théorie économique classique, la hausse de la demande dans un contexte d'offre limitée entraîne une hausse des prix. Pour pallier la rareté des matières premières (ressources primaires), le recours au recyclage est une des solutions. D'autres changements vont s'opérer en raison du progrès technique, parfois sous l'effet de hausses de prix temporaires : techniques d'exploitation pour exploiter des minerais de teneur moins élevée, développement de nouveaux procédés d'extraction pour exploiter d'autres minerais du même métal. Les hausses de prix peuvent aussi être une incitation économique au niveau des usages pour utiliser des substituts (métaux ou autres) à un métal donné.

Ces divers recours vont avoir pour conséquence de faire baisser le prix de la matière première.

On peut dissocier les questions soulevées par l'exploitation des ressources de métaux de base de celle des petits métaux et autres. Une des difficultés du recyclage est que les petits métaux ou terres rares sont difficilement séparables (du minerai par exemple). De manière générale, le recyclage de la matière n'est pas possible à 100 %.

On en conclut que l'on trouve toujours des réponses, dans le cadre d'une approche strictement économique, pour contourner les contraintes de rareté des réserves : soit sous l'effet premier des hausses de prix, soit avec l'aide des politiques publiques telles que la recherche et le développement sur les procédés d'extraction, les techniques de recyclage et les substituts possibles en aval (comme par exemple dans les différentes utilisations des petits métaux et des terres rares dans les différents composants du véhicule électrique). De même, des substitutions de matériaux sont à envisager. Dans cette logique économique, l'accès à de nouveaux types de gisements tels que l'exploitation des fonds marins ou l'exploration de l'Antarctique et du Groenland est une voie de sortie possible. Mais un des points aveugles de l'approche économique est la hausse des dépenses d'énergie et des impacts environnementaux pour l'exploitation de ressources de plus en plus difficiles.

### **Modélisation dynamique matières premières – énergie pour un développement mondial bas carbone**

*Olivier Vidal, Directeur de recherche, CNRS-ISTerre*

Dans le cadre de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, on développe notamment les énergies renouvelables pour remplacer les énergies fossiles.

La production d'électricité à partir de renouvelables, sans émissions de gaz à effet

de serre, génère néanmoins des pertes électriques (dilution lors de la transformation de l'énergie en électricité); la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables nécessite beaucoup plus d'infrastructures et donc plus de matières premières que celle à partir d'énergies fossiles (technologies classiques) à quantité d'électricité égale.

Du fait des pertes de matière au niveau du recyclage qui impliquent de nouveaux besoins de matières lors du remplacement de l'éolienne en fin de durée de vie, il y a plus de matières cumulées dans une éolienne recyclée que dans une éolienne primaire.

La demande en matières premières va augmenter à long terme. À titre d'exemple, on suppose que la demande globale de cuivre suivra l'évolution du PIB. Or, les analyses prévoient une multiplication du PIB par trois d'ici la fin du siècle, soit 70 millions de tonnes par an. La question de l'approvisionnement d'une telle quantité de matières premières se pose et les géologues répondent que c'est impossible. Il faut donc se tourner vers le recyclage des matières premières. Le recyclage est un moyen mais non une finalité car il y a des pertes au niveau de la collecte. Dans l'exemple du cuivre, de nouveaux gisements vont encore être découverts et la teneur du minerai diminuera, ce qui augmentera implicitement les stocks. Cela permet de répondre à court terme à la demande, qui devrait d'ailleurs au bout d'un certain nombre d'années se stabiliser à un niveau élevé.

Le prix de la matière devrait se maintenir constant et non augmenter du fait des progrès techniques et de la baisse de la concentration.

Les stocks de matières premières ne seront certainement pas suffisants pour satisfaire la demande croissante à long terme. Le recyclage est une solution mais non suffisante pour remplacer à 100 % la matière primaire de même que la baisse de la concentration de teneur.

### Métaux stratégiques et recyclage

*Christian Thomas, Directeur, Terra Nova Développement*

Le recyclage n'est pas efficace à 100 %. Certains objets comme les composants électroniques ne sont que très faiblement recyclables (l'usage dispersif, qui implique des pertes de collecte, est élevé), et la durée de vie de ces équipements est de plus en plus longue.

Quelques exemples :

- Le plomb a progressivement été supprimé de certains usages (peintures, inclusion dans les tubes de télévision, additifs pour essence...) mais il est largement utilisé dans les batteries. Les besoins sont estimés à environ 7 millions de tonnes par an. Le recyclage ne permet de couvrir que la moitié des besoins (3,5 millions de tonnes par an). Le complément provient de la production minière (production stable depuis 50 ans). Le ratio mine/recyclage est égal à 1.

- 50 % du cobalt est utilisé dans les équipements électriques et électroniques. La majorité (60 %) des réserves mondiales est localisée dans la *copper belt* africaine. La croissance de la demande de cobalt est forte (10 % par an), la durée de vie des produits est longue et les produits sont mal recyclés. Le ratio mine/recyclage est supérieur à 5.

- Le tantale est présent notamment dans des éléments électroniques comme les condensateurs et dans les écrans plats. Son prix est très élevé (150 \$/kg à 300 ppm). Le coltan africain est moins cher mais c'est un métal associé au travail des enfants. La croissance de la demande de tantale est faible, il est très mal recyclé et la durée de vie des produits est courte. Le ratio mine/recyclage est supérieur à 5.

La complexité du recyclage des équipements électriques et électroniques (on parle de déchets électriques et électroniques, ou DEEE) provient du fait que ces produits sont constitués d'un nombre important d'éléments chimiques (70 pour un écran plat versus 20 pour des organismes naturels comme un chat

par exemple). Or, les usines de recyclage ne permettent pas actuellement de traiter ce type de matière (car le traitement est différent de celui des métaux de base) ou au prix d'un lourd investissement d'adaptation de l'usine existante. La solution proposée est donc de créer de petites unités de recyclage spécifiques (avec une technologie adaptée) plutôt que d'utiliser les unités de recyclage standard et de les adapter. Il s'agit alors de développer des technologies de rupture qui permettront d'extraire les métaux aujourd'hui perdus.

### Session 3. Géopolitique et enjeux stratégiques

**Pour une approche globale de la criticité, du géologique au géopolitique. Quelques exemples de marchés de matières premières**

*Emmanuel Hache, Économiste et prospectiviste, IFP Energies nouvelles*

Le niveau de criticité d'une matière première renseigne sur les risques liés à son extraction, sa production, sa gestion de fin de vie. En résumé, il prend en compte les risques économiques, géopolitiques et environnementaux associés. La criticité n'est toutefois ni universelle, ni intemporelle, ni binaire. Son niveau s'évalue en fonction d'une échelle géographique (mondiale, nationale, régionale), de la nature de l'unité consommatrice (pays, industrie, entreprise ou technologie) et de l'échelle temporelle (aujourd'hui ou de manière prospective). Deux pays prédominent dans les publications sur le sujet depuis les années 2000 : la Chine et les États-Unis. Les dimensions géopolitique et prospective sont toutefois mal appréhendées dans l'évaluation du risque de criticité et les indicateurs retenus n'en renseignent que partiellement les risques (par exemple, l'indice de Herfindahl-Hirschman ou les «Worldwide Governance Indicators»).

Le projet GENERATE (Géopolitique des énergies renouvelables et analyse prospective de la transition énergétique), réalisé

conjointement par IFP Energies nouvelles et l'Institut de relations internationales et stratégiques et financé par l'Agence nationale de recherche a pour objectif d'analyser les conséquences économiques, géopolitiques et technologiques d'une diffusion des énergies renouvelables au niveau mondial. Pour cela, les analyses s'attachent à comprendre les relations causales entre acteurs et facteurs, interrogent différentes trajectoires prospectives de demande en matériaux de la transition bas carbone en prenant en compte la structure future des échanges pour évaluer de futurs risques géopolitiques potentiels. Le modèle TIMES (modèle *bottom-up* mondial représentant 16 zones ainsi que l'ensemble des secteurs énergétiques) est utilisé pour l'analyse. Les vulnérabilités sur le marché du lithium, du cuivre ou du ciment ont par exemple été étudiées sur la période 2005-2050 pour des projections de demande mondiale dans des scénarios respectant les objectifs climatiques (le scénario 2 °C par exemple). L'ensemble de ces résultats sont présentés dans le rapport publié en janvier 2019 par les partenaires du projet : «Vers une géopolitique de l'énergie plus complexe? Une analyse prospective tridimensionnelle de la transition énergétique».

### **Terres rares et métaux critiques pour le développement durable : quels enjeux stratégiques?**

*Patrice Christmann, Expert et chercheur indépendant, Krysmine*

Avec une démographie mondiale qui pourrait passer de 7,4 à 11 milliards d'habitants à la fin du siècle et dans un contexte de transition énergétique, la demande en matières premières stratégiques pourrait croître de façon considérable, non seulement en volume mais aussi en intensité matérielle (kg/habitant). Cette croissance est dominée par le ciment, l'aluminium, le cuivre et les nombreuses nuances de l'acier. La Chine est le premier producteur mondial d'une trentaine de matières premières minérales stratégiques ce qui lui confère un levier géopolitique considérable, notamment sur les marchés de métaux rares le plus souvent organisés de gré à gré.

Aujourd'hui le Chili détient 27 % de la production mondiale de cuivre mais Cochilco, la commission chilienne du cuivre, prévoit une augmentation de sa production de seulement 2 % d'ici 2028, alors que la demande mondiale pourrait croître de 2,5 % par an. La République démocratique du Congo pourrait devenir l'un des gros producteurs de cuivre à l'avenir, ce qui n'est sans doute pas sans risques environnementaux et géopolitiques, vu le poids des investissements chinois dans ce pays. En considérant les prix et les technologies actuels, les réserves en cuivre connues en 2015 seront épuisées vers 2040. Le cuivre est présent en grande quantité dans la croûte terrestre et l'exploitation est possible jusqu'à trois kilomètres de profondeur, mais il faudra intensifier les efforts d'exploration pour trouver des gisements dont l'exploitation sera plus coûteuse et exigera davantage de ressources en eau et en énergie. Un autre facteur limitant est la quantité considérable de déchets associés à l'extraction du cuivre : la teneur moyenne des minerais du Chili est de 0,6 % de cuivre (et la tendance est à la baisse des teneurs), ce qui représente 83 milliards de tonnes de déchets.

On préconise la circularisation de l'économie mondiale (privilégier une conception des produits sous formes de briques technologiques plus faciles à réparer, à remplacer et à recycler), une gouvernance des matières premières au niveau mondial par le biais de la création d'une agence internationale des ressources minérales sur le modèle de l'AIE, le développement des connaissances et des brevets, la transparence en encourageant les bonnes pratiques (procédures d'achats, éco-conception...) dans un contexte de croissance économique adossée à une baisse de quantité de matières premières *per capita*. Le site [www.mineralinfo.fr](http://www.mineralinfo.fr) propose des rapports sur les matières premières.



## Séminaire : les ressources non énergétiques, un frein aux transitions énergétiques ?

### **Des terres rares au lithium, stratégie de la Chine dans les matières premières stratégiques**

*Nicolas Mazzucchi, Chargé de recherche, Fondation pour la Recherche Stratégique*

La Chine est un producteur de matières premières stratégiques, fort d'une configuration géologique qui constitue la base de sa stratégie de transition énergétique. Ses avantages sont indéniables sur les marchés, notamment car il s'agit le plus souvent d'échanges de gré à gré. La Chine est le producteur le plus diversifié en termes de matières et de volumes exploités, devançant la Russie, le Brésil, les États-Unis et l'Afrique du Sud. Son ambition est de maîtriser l'ensemble de la chaîne de valeur : production minière (dominée par la Chine) ► raffinage et transformation (pour le moment dominés par l'Union européenne, exemple : Solvay) ► manufacture et assemblage (dominés par la Chine) ► intégration dans les systèmes nationaux (domination occidentale aujourd'hui).

Acteur dominant sur deux des segments de la chaîne de valeur (extraction, manufacture), son ambition est de devenir également leader sur les deux autres segments. La plupart des brevets déposés dans le domaine du raffinage des matières proviennent actuellement d'entreprises chinoises et la prévalence européenne dans ce domaine devrait disparaître d'ici quelques années.

Les entreprises chinoises se positionnent aussi en tant qu'intégrateurs en raison de leur présence de plus en plus importante, en Europe notamment. Un exemple intéressant est celui du lithium : les entreprises chinoises investissent massivement dans des entreprises d'extraction de ce minerai et la Chine conserve un positionnement politique fort dans les pays du triangle du lithium (Chili, Bolivie, Argentine). Son ambition est de centraliser la production des batteries en Chine (2/3 des productions actuelles) et de submerger le marché par les volumes face aux concurrents (Tesla vient de signer un contrat pour implanter sa prochaine «Gigafactory»

près de Shanghai). On peut prédire une domination chinoise sur l'ensemble de la chaîne de valeur dans moins de dix ans. La transition énergétique est un énorme levier de croissance et la Chine l'a bien compris.

### **Dialogue avec la salle**

Une nuance est apportée sur les brevets : bien que les usines soient situées en Chine, les brevets ne sont pas forcément chinois (exemple : brevet Hitachi pour les aimants permanents). On souligne une incohérence entre une recherche non aboutie en Europe et une demande mondiale croissante pour les batteries. Deux modèles s'opposent : la politique industrielle et la libéralisation des marchés. Il est rappelé que les leaders chinois ont une culture scientifique (Xi Jinping est ingénieur chimiste) et une stratégie de long terme sur ces sujets.

L'Europe paie le prix d'une culture d'économie de marché sans stratégie de long terme. Il devient dès lors nécessaire de créer des champions européens comme «l'Airbus du solaire» ou «l'Airbus de la batterie».

Les États-Unis possèdent une réserve de trois ans de matières premières stratégiques pour la défense américaine alors il n'y a pas de stock en Europe : toute la question est de savoir si c'est souhaitable d'une part et si c'est faisable d'autre part.

Depuis 2015, la Chine ferme des mines clandestines de terres rares et se préoccupe de plus en plus des normes environnementales, premier risque politique vu par le gouvernement chinois. La stratégie de la Chine pourrait être d'imposer ses normes au reste du monde quand elle aura atteint une maturité technologique suffisante. Le projet des routes de la soie est aussi une opportunité pour imposer ses normes aux régions concernées et notamment dans le secteur électrique, avec des acquisitions réalisées au Portugal, en Grèce et en Italie.

Pour conclure, une citation de Sun Tzu, auteur de *L'Art de la guerre* au VI<sup>e</sup> siècle av. J.-C. : «Ce qui est intelligent, ce n'est pas de gagner cent guerres après cent batailles, ce qui est intelligent c'est de gagner la guerre sans bataille».

### **Table ronde. Les matières stratégiques sont-elles un goulet d'étranglement pour la transition énergétique?**

**Présidée par Jacques Percebois, Professeur émérite, Université de Montpellier**

*Bernard Tardieu, président de la Commission «Énergie et Changement climatique» à l'Académie des Technologies, coprésident avec Ghislain de Marsilly de l'Académie des Sciences d'un groupe de travail sur les métaux rares*

L'Académie des Technologies, sollicitée sur la question des métaux rares, a reçu une réponse du président de la République, sensible au sujet qui nécessite «une évaluation réaliste et une utilisation optimisée de nos ressources». Néanmoins l'administration française n'est pas organisée pour la transversalité que ce sujet implique : les administrations de l'énergie, des souterrains...

L'approche proposée par le rapport de ce groupe interacadémique est que le marché des métaux rares va s'approfondir et résoudra *in fine* les problèmes sur ces ressources. La difficulté est de résoudre ces problèmes pacifiquement, sans conflit. En France, alors qu'il existe un sous-sol à exploiter, la tendance a été de sanctuariser au lieu d'exploiter ce potentiel; par exemple, il y a du lithium dans l'eau de la zone géothermique rhénane. Et il est possible de développer des exploitations respectueuses de l'environnement avec la technologie de mine liquide. Cette technologie pourrait s'exporter en Bolivie où des réserves importantes existent : la France a donc un rôle à jouer, malgré sa petite taille, dans le nouveau monde minier qui s'annonce.

*Maurice Leroy, Vice-président, Commission Nationale d'Évaluation des recherches et études relatives à la gestion des matières et des déchets radioactifs, président du Conseil Scientifique de la Direction Applications Militaires au CEA, chimiste*

Si on ne développe pas le recyclage et la substitution, il y aura évidemment un goulet d'étranglement au niveau des ressources en métaux rares. Après le premier choc pétrolier, l'ADEME avait monté un programme sur l'économie des matières premières et beaucoup de laboratoires avaient travaillé sur ces questions. Il est donc possible, et très important, de mener une recherche collaborative et rentable. Par ailleurs, il est également important que l'Union européenne définisse des règles environnementales. La substitution est un problème particulièrement compliqué dans la mesure où la position d'un élément dans le tableau périodique fige ses propriétés — et ce depuis le Big Bang. Il faut donc soutenir la recherche sur ce sujet en particulier.

*Philippe Chalmin, Université Paris-Dauphine, historien, responsable du rapport Cyclope*

Le début des années 1970 avait vu une époque similaire, avec la sortie de l'ouvrage *Halte à la croissance*. En raison de la guerre de Corée, les États-Unis avaient constitué un stock de 5 ans de matières premières, où figuraient notamment l'étain et les plumes d'autruche. C'est dire si la notion de matières premières stratégiques est une notion qui évolue dans le temps. On parle beaucoup de cobalt et de tungstène, mais en 2018, le métal dont le prix a augmenté de 152 % est le valladium, à cause d'installations chinoises fermées pour raisons environnementales. La consommation d'aujourd'hui n'a donc pas de sens pour l'avenir, car elle aura changé d'ici là. Or, la mine est un domaine d'activité où les temps sont longs : il peut se passer 15 ans entre son ouverture et l'atteinte du plein régime. C'est aussi une activité où les contraintes environnementales sont croissantes. Par exemple, l'énorme projet minier en Guyane «Montagne d'or» rencontre

énormément d'opposition. De façon générale, aucun pays n'a construit une économie sur une industrie minière : elle est une source de déséquilibre politique et de tensions sur le marché. Même le marché du recyclage a été perturbé par l'embargo de la Chine sur les déchets. Le risque politique est donc très fort.

### Dialogue avec la salle

Le critère de criticité est évoqué par la salle comme très dépendant de ce qu'on fait du métal. La prise de conscience des constructeurs automobiles quant à leur dépendance aux métaux rares s'est faite récemment ; en revanche les avionneurs et autres industriels, tel Safran, ne semblent pas conscients de cette dépendance (ou alors légèrement sur le cobalt). Il y a un effort à faire dans l'ensemble du monde industriel pour comprendre sa dépendance, usine par usine, métier par métier.

Philippe Chalmin évoque l'arbitrage qu'ont dû faire les constructeurs automobiles entre platine et palladium : les voitures diesel nécessitent plutôt du platine et celles à essence plutôt du palladium. Avec le «dieselgate», le palladium s'est mis à valoir plus cher que le platine et l'or. Bernard Tardieu souligne que les constructeurs automobiles sont à la base des motoristes, mais pas des motoristes électriques. Avec la transition électrique, ils devront rechercher de nouveau la technologie.

La question de la coopération sur le sujet des mines est abordée. Philippe Chalmin rappelle qu'il est encore plus difficile d'ouvrir une usine que d'en fermer une. La Rochelle était «Mecque des terres rares» mais a dû fermer en raison des problèmes de déchets radioactifs.

Bernard Tardieu décrit le concept de forage profond : ramener l'eau avec les minerais puis réinjecter l'eau après extraction. L'Académie des Sciences essaie de convaincre le gouvernement d'exploiter ce type de mines «liquides». Philippe Chalmin rappelle que l'exploration pour le gaz de schiste a été interdite donc qu'il y a peu d'espoir pour ce type d'extraction également.

La question de l'embargo provoqué par la Chine et de l'utilisation de ce procédé dans les luttes commerciales est abordée. Philippe Chalmin rappelle que l'utilisation de l'arme des matières premières n'a jamais été positive (cf. l'OPEP et l'embargo politique sur le pétrole, ou l'embargo américain sur les céréales). Dans les guerres commerciales, la matière première est toujours en première ligne. Il est évident que la Chine va chercher à garder ses matières premières ; sa seule dépendance concerne le minerai de fer. De façon similaire, la Chine elle-même a été bloquée dans le rachat d'une mine brésilienne.

Une question est posée sur la Nouvelle-Calédonie : si un référendum lui donnait son indépendance, quel serait l'impact sur les matières premières ? Réponse : sa dépendance au nickel serait dramatique.

Une dernière question porte sur le coût pour investir dans le nickel : un projet de raffinerie/mine ne remplira pas les objectifs d'un investisseur classique aujourd'hui. Comment changer les objectifs de rentabilité des fonds d'investissements ?

Philippe Chalmin insiste sur le fait que quand on prend la décision d'investir, on ne sait pas quel sera le prix de la matière première dix ans plus tard. Lors des quinze dernières années, le prix du nickel a varié entre 3000 et 55000 \$/t. Il existe donc des incertitudes très fortes pour l'investisseur auxquelles il est difficile de remédier.

À l'issue de la discussion, Maurice Leroy conclut qu'il y a en effet un goulot d'étranglement. Philippe Chalmin pense qu'il en existe un au niveau français, mais pas vraiment au niveau mondial ; c'est la dimension géopolitique qui maintient la permanence d'aléas et donc la volatilité des cours — il est certain que demain les prix du cobalt, des terres rares, du dollar seront différents d'aujourd'hui. Bernard Tardieu espère surtout que les échanges de matières premières se feront sans guerre, et estime que les mines devront être environnementalement acceptables.

En conclusion de la table ronde, Jacques Percebois a partagé quelques réflexions qu'il a tirées du séminaire. Pour répondre à la question de savoir si les ressources non énergétiques peuvent constituer un goulot d'étranglement à la transition énergétique, il faut, comme les débats de cette journée l'ont montré, se placer à divers niveaux et aborder la question sous divers angles :

1 Préciser la typologie et regarder les ressources dont on parle car le degré de criticité n'est pas le même selon que l'on parle de métaux stratégiques, de métaux rares, de terres rares; il est nécessaire de s'appuyer sur des statistiques fiables et d'examiner les besoins présents et futurs de ces diverses ressources compte tenu de ce que sera la pression démographique mondiale et le développement des nouvelles technologies du numérique. Les énergies renouvelables (solaire et éolien) sont particulièrement gourmandes en ressources de ce type.

2 Examiner l'évolution du rapport ressources/production qui est un indicateur instantané du degré de tension entre l'offre et la demande. Ce ratio dépend bien évidemment du prix de valorisation des ressources, du coût d'accès aux réserves et du progrès technique qui permettra de trouver de nouveaux gisements. Les ressources existent mais leur coût d'accès est parfois très élevé. La localisation géographique des réserves prouvées et des ressources potentielles est importante. Mais il ne faut pas se limiter à regarder la localisation de l'extraction; il faut aussi tenir compte du lieu de raffinage de certains métaux. Certaines ressources sont extraites en Amérique du Sud mais raffinées en Chine. L'un des problèmes auquel il faut faire face, c'est de prévoir la quantité d'énergie nécessaire pour exploiter des métaux de moins en moins concentrés. Il faut de l'énergie pour extraire, raffiner, recycler ces matières premières.

3 Anticiper les stratégies d'acteurs, que ce soit les États ou les sociétés minières. Certains pays essaient de contrôler les matières premières stratégiques (la Chine mais pas

seulement), d'autres essaient de s'en passer en misant sur la recherche de substituts. Le contrôle des brevets est un point essentiel. La Chine, par exemple, a opté pour une stratégie dite de «prix-limite» pour les terres rares. On fixe un prix suffisamment élevé pour garantir une bonne rentabilité mais pas trop élevé afin de ne pas inciter l'entrée massive de nouveaux opérateurs dans la branche. Ce fut déjà le cas avec le solaire photovoltaïque.

4 Les débats ont beaucoup insisté sur la nécessité d'opter pour le recyclage des métaux rares. Ce potentiel de recyclage est considérable et c'est une assurance face à un risque de pénurie future. Il faut ainsi dissocier deux choses : le taux de recyclage des métaux, c'est-à-dire le pourcentage des déchets recyclés, d'une part, le poids du recyclage des métaux par rapport aux besoins, d'autre part. Ces deux ratios varient selon les cas. Il faut enfin se préoccuper du devenir des déchets ultimes non recyclés.

5 Favoriser la recherche-développement pour provoquer des ruptures technologiques permettant de trouver demain des substituts à certaines ressources stratégiques qui pourraient constituer un goulot d'étranglement potentiel. La substitution est, à côté du recyclage, l'une des solutions pour éviter une trop forte dépendance à l'égard de certains métaux ou de certains pays.

On peut dès lors considérer que sous certaines conditions ces métaux et terres rares ne devraient pas constituer un goulot d'étranglement à la transition énergétique mais cela requiert des efforts de recherche et des stratégies d'investissement adaptées.