



INSTITUT DE FRANCE
Académie des sciences



ACADÉMIE
DES TECHNOLOGIES

POUR UN PROGRÈS RAISONNÉ, CHOISI ET PARTAGÉ

Stratégie d'utilisation des ressources du sous-sol pour la transition énergétique française

Les métaux rares

Rapport commun des deux académies

coordonné par

Ghislain de Marsily

&

Bernard Tardieu

mai 2018

Académie des sciences
23 quai Conti
75006 Paris
+33(0)1 44 41 43 59
www.academie-sciences.fr

Académie des technologies
Grand Palais des Champs-Élysées - Porte C
Avenue Franklin D . Roosevelt - 75008 Paris
+33(0)1 53 85 44 44
secretariat@academie-technologies.fr
www.academie-technologies.fr

© Académie des sciences — Académie des technologies 2018
ISBN : 979-10-97579-08-01

Table des matières

Table des matières	3
Résumé exécutif	7
<i>Des besoins en matériaux pour la France</i>	8
<i>Un risque élevé d'instabilité des cours des matières premières</i>	9
<i>Les réponses possibles et les stratégies industrielles associées</i>	10
<i>Des technologies à choisir en fonction de la disponibilité des matériaux et de l'impact sur l'environnement</i>	11
<i>Un avenir minier possible</i>	12
<i>En conclusion</i>	12
Recommandations	15
1. <i>Anticiper les tensions éventuelles</i>	15
2. <i>Connaître les ressources de la France</i>	16
3. <i>Soutenir la transition énergétique par les technologies appropriées</i>	16
4. <i>Tirer un avantage industriel de l'engagement dans la transition énergétique</i>	17
5. <i>Adapter le cadre législatif et réglementaire</i>	17
Introduction	19
Avant-propos	23
Chap. I — Le potentiel en matières premières de notre sous-sol	27
<i>Les ressources minérales nécessaires à la transition énergétique sur le territoire national continental</i>	27
<i>Les ressources minérales marines, une ressource stratégique pour la France</i>	38
Chap. II — Les hypothèses de base sur les technologies et les ruptures potentielles	43
<i>Des technologies de production</i>	43
<i>Des technologies de stockage d'énergie</i>	46

Chap.III — Les scénarios de transition énergétique et les besoins en matériaux associés	49
<i>Les scénarios possibles</i>	51
<i>Les besoins en matériaux des nouvelles puissances électriques et stockages installés</i>	52
<i>Les besoins liés à l'utilisation rationnelle de l'énergie</i>	60
<i>En synthèse</i>	62
<i>Le recyclage</i>	65
<i>La nécessité de choix technologiques stratégiques</i>	66
<i>Interprétation de la comparaison des besoins aux productions et ressources disponibles</i>	71
Conclusion	75
Composition du groupe de travail	77
<i>Coordination éditoriale</i>	78
ANNEXES	79
A1 — Documents sur les matériaux de la transition énergétique	81
A2 — Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques	83
<i>Propositions</i>	83
A3 — L'Europe	87
A4 — Rapport des académies allemandes Acatech et Leopoldina	89
<i>Exploitation minière pour la transition énergétique</i>	89
<i>Recommandations</i>	89
A5 — Analyse critique du rapport de la Banque mondiale : Le rôle croissant des matières minérales dans un futur à faibles émissions de carbone	93
<i>Implication des objectifs de réduction des émissions de carbone sur la demande en matières métalliques</i>	94
<i>Distribution géographique des ressources</i>	96
<i>Conclusion concernant le rapport de la Banque mondiale</i>	96

A6 — Les hypothèses de base sur les technologies et les ruptures potentielles	99
<i>Production d'énergie</i>	100
<i>Les systèmes de stockage d'énergie</i>	107
<i>L'interchangeabilité gaz et électricité</i>	113
<i>Les techniques de gestion du réseau électrique</i>	117
<i>Les techniques d'utilisation rationnelle de l'énergie</i>	117
A7 — Les ressources minérales marines accessibles à la France	119
<i>La ZEE</i>	120
<i>Les minerais</i>	121
<i>Les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines</i>	131
A8 — Quelques remarques sur l'économie des matières premières	135
<i>La question</i>	135
<i>Le ratio R/P</i>	135
<i>La courbe de coût de développement des réserves</i>	138
<i>L'environnement</i>	139
<i>Exporter plus au lieu de produire à perte des métaux sur le territoire</i>	140
<i>Que faire de l'argent public ?</i>	141
A9 — Tableau des abréviations	145

Résumé exécutif

La question de la disponibilité des matériaux nécessaires à la transition énergétique n'est pas nouvelle, et a déjà fait l'objet de nombreux rapports et documents cités en Annexe I. La transition énergétique va nécessiter la construction d'installations de production d'énergie beaucoup plus consommatrices d'espace, de matériaux de construction traditionnels (fer, béton, cuivre, etc.), et aussi de matériaux peu utilisés jusqu'ici, mais nécessaires à certaines des technologies dont beaucoup sont émergentes. Cette demande en matières premières augmente à l'échelle mondiale sur tous les métaux et matériaux (de base et « petits métaux ») en même temps pour tous les pays développés ou en développement.

L'objectif de ce rapport est de conseiller les pouvoirs publics sur les besoins de la France, sur ses choix possibles, et suggérer les stratégies qui pourraient être suivies au cas par cas.

Les besoins en matériaux sont évalués pour :

- la production d'électricité renouvelable (éolien à terre et en mer, solaire photovoltaïque et thermodynamique, électrolyse et pile à combustible) ;
- la production d'hydrogène par électrolyse ainsi que son utilisation dans des piles à combustible ;
- le stockage d'énergie mobile pour les transports ;

- le stockage stationnaire d'électricité pour compenser l'intermittence de certaines ENR électriques ;
- le stockage long terme d'autres vecteurs d'énergie (méthane, hydrogène, chaleur, air comprimé), et du CO₂ dans le sous-sol.

La méthode utilisée consiste à évaluer les quantités de matériaux nécessaires pour réaliser les objectifs énergétiques, au seul niveau national, des scénarios proposés par le gouvernement à l'horizon 2050. Ce scénario prévoit 30 GW en électricité éolienne, 20 GW en électricité photovoltaïque et 100 % de véhicules électriques à batteries dès 2040. Les technologies exploitées mobilisent du lithium, pour la technologie actuelle la plus performante de stockage chimique d'électricité (batteries), certaines terres rares comme le dysprosium, le néodyme et le samarium pour les moteurs et les génératrices électriques à aimants permanents utilisés dans les éoliennes et un nombre croissant de moteurs de véhicules, le tellure, l'indium, l'étain, l'argent, le gallium, le sélénium, le cadmium, pour les technologies en « couches minces » des panneaux solaires, le platine, l'iridium, le cobalt, le ruthénium, l'indium, l'or pour les différents types de catalyseurs (piles à combustible, électrolyseur pour la production d'hydrogène, biocarburants de différentes générations), le cuivre et l'acier pour les réseaux et les infrastructures, les sables très purs pour le verre, les sables et graviers pour les fondations et structures des éoliennes. Il est à noter que certains de ces éléments sont extrêmement toxiques (cadmium...).

Des besoins en matériaux pour la France

Le rapport compare les besoins liés au programme de la France (étant entendu que les véhicules et équipements ne seront pas nécessairement fabriqués en France, mais que les besoins en matériaux sont réels, quel que soit le lieu de fabrication) à la production actuelle mondiale (il serait bien sûr préférable de comparer aussi à l'évolution de la demande mondiale,

mais l'exercice n'est pas réalisable à ce stade], et explore le potentiel du sous-sol de notre pays. Dans de nombreux cas, par exemple les matériaux traditionnels ou les terres rares, les besoins de la France sont négligeables à l'échelle de la planète. Mais la France peut choisir de jouer un rôle sur le marché de l'offre si ses ressources le permettent et si le modèle économique et sociétal est acceptable. C'est le cas par exemple du nickel, pour lequel notre consommation dans le scénario analysé est inférieure à la production de la Nouvelle-Calédonie. En revanche, pour le lithium et le cobalt, la demande française dans le cadre du scénario retenu dépasse la production mondiale actuelle. L'analyse économique montre que le flux financier annuel global pour les seuls véhicules électriques à batteries est du même ordre de grandeur que celui des importations actuelles de pétrole pour assurer l'approvisionnement en carburant.

Un risque élevé d'instabilité des cours des matières premières

Dans la période de transition entre l'industrie des hydrocarbures et du charbon et l'industrie sans émissions de gaz à effet de serre, le risque d'instabilité des cours des matières premières nécessaires à cette transition est élevé. Il existe un risque de monopoles de certains producteurs et un risque majeur d'exploitations minières insuffisamment maîtrisées avec des conséquences inacceptables pour l'environnement et la santé.

Les conséquences environnementales de l'exploitation et du raffinage de certains matériaux comme les terres rares et le lithium, doivent conduire au développement de nouvelles méthodes d'exploitation. Ces méthodes auront des coûts supérieurs qui pourront créer des effets d'aubaine pour les pays les moins exigeants en matière de protection de l'environnement, et ainsi entrer en contradiction avec les objectifs de la transition énergétique et écologique.

Les réponses possibles et les stratégies industrielles associées

Parmi les réponses possibles, nous recommandons d'analyser les ressources exploitables en France (métropole et outre-mer), y compris dans le domaine maritime, d'organiser l'usage du sous-sol pour le stockage d'énergie à grande échelle, et d'approfondir les techniques de recyclage des métaux avec les modèles économiques associés.

La croissance rapide de la demande modifie les stratégies des sociétés minières et permet dans beaucoup de cas d'adapter la production à la demande. Cette adaptation se fait en fonction de la localisation de la ressource et peut donc donner un avantage stratégique à certaines régions du monde, comme cela a été, par exemple, le cas pour le pétrole. Les technologies évoluent vite, les adaptations industrielles sont relativement rapides car pour certains matériaux, l'exploitation massive en est encore à ses débuts. Les choix technologiques liés aux disponibilités de matériaux sont flexibles. À moyen terme, passé la période de transition, le marché jouera son rôle comme, par exemple, pour les hydrocarbures ou le charbon. Il faut œuvrer pour que cela se passe dans le cadre d'une diplomatie pacifique.

La disponibilité à coût raisonnable et à impact environnemental acceptable dépend des technologies utilisées. La demande nationale et mondiale est influencée par les politiques publiques d'encouragement et les choix des industriels pour certaines technologies, en fonction des recherches les plus prometteuses. Par exemple, le choix du lithium pour certains types de batteries n'est pas définitif. Des solutions moins consommatrices de lithium ou utilisant d'autres matériaux font l'objet de recherches avancées dans lesquelles notre pays est actif, même si la majorité de l'effort mondial est aujourd'hui consacrée aux batteries au lithium. Par ailleurs, les batteries pour les véhicules électriques peuvent

laisser la place à des piles à combustible à hydrogène ou à méthane, par exemple pour les véhicules lourds, et surtout à des systèmes hybrides mêlant les deux technologies.

La question se pose également pour les matériaux nécessaires aux aimants permanents des moteurs et des génératrices (notamment de certains types d'éoliennes). Des solutions sans aimants permanents existent (à moteurs bobinés) et leur développement est largement dépendant du marché du dysprosium et du néodyme, où les tensions sont reflétées par les prix dans un contexte donné. Il est de la responsabilité de notre pays de garder en réserve ou de développer en parallèle des solutions technologiques alternatives pour garantir son indépendance.

Des technologies à choisir en fonction de la disponibilité des matériaux et de l'impact sur l'environnement

Les nouvelles technologies de la transition énergétique doivent être choisies en tenant compte de l'accès potentiel aux matériaux nécessaires en considérant les impacts environnementaux, l'évolution possible de leur prix et les capacités de recyclage ultérieur. Le programme de véhicules électriques français examiné fait appel à des quantités de lithium et de cobalt très élevées, qui excèdent, en fait et à technologie inchangée, les productions mondiales d'aujourd'hui, et ce pour satisfaire le seul besoin français !

La conclusion à en tirer n'est pas que cette transition est infaisable, mais plutôt qu'elle ne pourra être réalisée sans adaptation technologique ni sans modification significative de la chaîne d'approvisionnement. Le choix des technologies d'électrolyseurs et de piles à combustible doit être fait en fonction du coût, de l'accessibilité et du prix des catalyseurs, qui jouent un rôle clé dans les rendements obtenus.

Un avenir minier possible

Dans cette nouvelle donne, la France a un avenir minier possible. La Nouvelle-Calédonie fournit déjà du nickel, du chrome et du cobalt (qu'il faut développer). La Guyane présente un potentiel pour différents métaux : niobium, tantale, tungstène, étain, lithium, cobalt et or. En Europe, le Massif armoricain et le Massif central, sont les régions parmi les plus riches en matériaux stratégiques connus dans les premiers 500 m depuis la surface. Une recherche et une exploration à plus grande profondeur sont souhaitables. Les techniques actuelles le permettent, des mines profondes environnementalement et socialement acceptables ont effectivement été développées dans plusieurs pays occidentaux. D'autres procédés permettent d'extraire des éléments stratégiques de matériaux utilisés pour d'autres usages : c'est le cas pour le lithium, qui peut-être un sous-produit de l'industrie du kaolin ou qui peut être extrait directement des eaux géothermales.

Le propos n'est pas de mettre « à tout prix » en exploitation le sous-sol français, mais de savoir s'il contient certains des matériaux nécessaires à la transition énergétique et d'examiner les conditions dans lesquelles, le cas échéant, cette ressource pourrait être exploitée de façon économiquement et environnementalement acceptable et stratégiquement utile.

En conclusion

Si des choix dictés par l'intérêt du pays sont faits par les pouvoirs publics et les entreprises actives dans le secteur — des choix qu'elles ne feront que si elles ont une perspective d'activité rentable au moins à terme et hors incitation fiscale, par nature à court terme — si des options ouvertes sont conservées en permanence sur des technologies alterna-

tives permettant de changer de filières en cas de tensions trop fortes sur certaines ressources, on peut penser qu'il n'y aura vraisemblablement pas de pénurie des matériaux nécessaires à la transition énergétique. Constituer des stocks stratégiques publics peut être une option à envisager pour se prémunir contre des tensions ponctuelles sur les prix.

Recommandations

Elles se regroupent en cinq familles :

1. Anticiper les tensions éventuelles

Faire analyser par le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) les possibilités d'accès à certaines ressources minérales rares¹, et à des nouveaux matériaux nécessaires au développement industriel des technologies émergentes.

Comparer les projections de demande de ces différents matériaux² avec les plans de développement des technologies associées. Inciter les groupes industriels à ajuster leur stratégie à la disponibilité prévisible des matériaux concernés à diverses échéances.

Prendre en compte dans ces analyses les modalités nouvelles de l'exploitation de ces matériaux, en particulier les technologies à développer (extraction sélective minimisant les déblais et déchets...), susceptibles d'être perçues positivement par les populations concernées.

////////////////////////////////////

- 1 Comme le lithium, le dysprosium, le néodyme, le samarium, le cobalt, le tungstène, le zinc, le tantale, le niobium, le germanium, le gallium, l'indium et le tellure.
- 2 Notamment le lithium.

Faire évaluer l'impact de ces modalités d'exploitation nouvelles sur les prix et sur les risques d'émergence de positions mondiales dominantes.

2. Connaître les ressources de la France

Faire approfondir par le BRGM, en association avec le CNRS et les universités, l'étude de la présence éventuelle de ces matériaux dans le sous-sol français au-delà de 500 mètres de profondeur (Massif Central et Massif armoricain, Pyrénées en Ariège, Nouvelle-Calédonie, Guyane).

Développer une stratégie de connaissance des ressources minérales sous-marines dans la zone économique exclusive française et dans les eaux internationales, pour s'approprier les moyens potentiels de les explorer et de les exploiter.

3. Soutenir la transition énergétique par les technologies appropriées

Donner mission à l'Alliance Ancre et aux entités qui la composent pour la recherche sur l'énergie de développer la réflexion sur les technologies les plus économes en certains matériaux pouvant potentiellement devenir rares.

Développer l'industrie du recyclage sur tous les matériaux, en particulier ceux dont la demande est croissante et très supérieure à la production fraîche. Construire une chaîne de valeurs qui justifie économiquement le recyclage des matériaux, en mettant en œuvre les incitations normatives et réglementaires appropriées.

Souligner la prise en compte dès la phase de conception des possibilités de récupération des éléments-clés des nouveaux matériaux.

4. Tirer un avantage industriel de l'engagement dans la transition énergétique

Sélectionner les matériaux critiques³, tant pour la France que pour le monde, qui pourraient permettre à des opérateurs français de créer une chaîne de valeurs complète pour développer des industries à forte valeur ajoutée, profitant à notre économie, créant des emplois et respectant l'environnement.

5. Adapter le cadre législatif et réglementaire

Favoriser le développement de stockages souterrains de gaz ou de chaleur, qui sont des modalités importantes du nécessaire stockage saisonnier de l'énergie.

Adapter le cadre législatif et réglementaire (rédiger un code du stockage) et encourager la recherche (modélisation, instrumentation, mesure).

Faire du code minier un instrument de la transition écologique et énergétique, éclairée par la connaissance des ressources minérales à l'échelle planétaire et française, et par la maîtrise des procédés d'extraction.

Un guide des meilleures pratiques a été préparé par la Commission européenne dont le législateur pourrait s'inspirer avec profit⁴.

Imaginer un récit collectif national qui inscrive la démarche de l'utilisation du sous-sol français dans le cadre de la transition énergétique et écologique.

3 Ces matériaux pourraient être le lithium, le cobalt, le tungstène, le zinc, le tantale, le niobium, le germanium, le gallium, l'indium et le tellure, mais cette liste est à confirmer.

4 [file:///C:/Users/tsalm/Downloads/Report-CSES-Raw%20materials-Best%20practice-20140314%20\[1\].pdf](file:///C:/Users/tsalm/Downloads/Report-CSES-Raw%20materials-Best%20practice-20140314%20[1].pdf), page 35.

Introduction

Parce qu'une très large part des habitants de la planète a pris conscience de l'impact de la consommation énergétique sur le climat, il a été collectivement décidé à Paris en 2015 à la COP 21 de réduire les émissions mondiales de gaz à effet de serre. Bien que les ressources fossiles soient abondantes et relativement peu coûteuses, cela conduit à engager une transition énergétique dans laquelle les énergies fossiles sont progressivement remplacées par des énergies dont le bilan carbone ne produit pas d'émissions de gaz à effet de serre. Parmi ces énergies, celles qui sont renouvelables ont l'avantage d'être potentiellement plus décentralisées et mieux réparties sur la planète, permettant ainsi une autonomie de certains territoires isolés.

Ce choix n'est pas sans conséquence sur l'usage qui serait fait d'autres ressources naturelles de la planète, en particulier des ressources minières. En effet, un des avantages des combustibles fossiles est qu'ils sont un concentré d'énergie. Les énergies renouvelables, elles, sont notablement plus diluées et leur production demande donc plus de matériaux pour les capter. Certains sont bien connus, comme le fer, le cuivre, l'aluminium, le plomb, le ciment ou les agrégats. D'autres étaient déjà présents et utilisés dans le monde de l'industrie, mais en quantité beaucoup plus faible que ce qui devient nécessaire pour la transition énergétique, comme le lithium, le cobalt, le nickel, le chrome, l'argent, l'étain, le cadmium, le manganèse, certaines terres rares, etc. Cette mutation profonde de l'industrie minière, métallurgique et des besoins en matériaux en général

requis par la transition énergétique mérite d'être analysée avec soin de façon à pouvoir anticiper les éventuelles tensions pouvant apparaître sur certaines ressources minières potentiellement rares ou très inégalement réparties sur Terre.

C'est pourquoi l'Académie des technologies et l'Académie des sciences ont décidé de constituer un groupe de travail commun pour analyser les ressources potentielles en métaux et matériaux nécessaires à la transition énergétique et disponibles dans le sous-sol terrestre et maritime français, avec en perspective les ressources potentielles mondiales.

Pour porter à la connaissance de M. le Ministre d'État, ministre de la transition écologique et solidaire Nicolas Hulot de la mise en place de ce groupe de travail, une lettre lui a été envoyée le 9 juillet 2017 :

Monsieur le Ministre d'État,

Le Plan Climat, que vous avez rendu public le 6 juillet dernier, définit les conditions d'une politique ambitieuse pour la transition énergétique, que l'Académie des sciences et l'Académie des technologies proposent d'accompagner dans le cadre de leur mission de conseil auprès des pouvoirs publics.

La transition énergétique et l'utilisation des énergies renouvelables, dont l'accélération fait l'objet de l'Axe 14 du Plan Climat, sont consommatrices de matériaux peu utilisés jusqu'à présent et dont la valeur évolue en fonction de leur rareté et de la demande : terres rares pour les aimants des éoliennes, vanadium et rhénium pour la catalyse, lithium pour le stockage des batteries... En outre, la transition énergétique requiert une quantité croissante de matériaux traditionnels tels que l'acier, le béton et le cuivre, au-delà de la simple extrapolation des courbes actuelles.

Afin de faciliter l'adaptation de notre industrie à ce marché nouveau, les académies françaises des sciences et des technologies ont constitué au début de l'année 2017 un groupe de travail conjoint baptisé « Ressources du sous-sol français pour la transition énergétique », dont la première

mission est l'analyse des ressources du sous-sol français (y compris maritime et ultramarin) susceptibles de donner à notre pays une garantie d'indépendance industrielle et énergétique. Cette analyse porte aussi bien sur les domaines où le marché mondial assure la satisfaction des besoins de l'industrie française de manière durable et à un prix raisonnable, que sur les domaines où ce sont les ressources nationales qui pourraient apporter un avantage stratégique, industriel et financier à nos entreprises, ne serait-ce que comme argument lors de négociations commerciales.

Dans cet esprit, les deux académies souhaitent mettre à la disposition du gouvernement les résultats de leurs travaux destinés à préciser le potentiel stratégique du sous-sol de notre pays.

L'ensemble de ces ressources, une fois identifiées et répertoriées, serait si nécessaire mis en valeur par des méthodes d'exploitation nouvelles et selon des standards environnementaux d'une rigueur supérieure à ceux appliqués dans certains pays d'où les matières premières sont actuellement importées. En outre, au-delà d'une exploitation au bénéfice de la dynamisation de notre économie, le fruit de cette recherche – et surtout les techniques qui en résulteront – devrait pouvoir être transféré vers les pays moins favorisés, dont l'exploitation des richesses minières provoque des pollutions d'ampleur dramatique. Nos deux académies ont pour ambition que notre pays soit une référence en termes d'inventivité et d'audace au profit de la planète.

Nous nous inscrivons ainsi dans l'Axe 12 du Plan Climat : Miser sur la recherche et l'innovation pour trouver les solutions d'avenir, ce qui suppose d'aborder les problèmes sans a priori, avec comme ligne de conduite le déploiement d'une méthode scientifique rigoureuse au bénéfice de la société.

Restant à votre disposition pour vous exposer notre démarche, nous vous prions d'agréer, Monsieur le Ministre d'État, l'expression de notre haute considération.

Signé : B. Tardieu et G. de Marsily

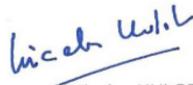
Monsieur Nicolas Hulot, ministre d'État, a bien voulu répondre le 11 septembre 2017 :

Monsieur,

Vous avez bien voulu appeler mon attention sur vos travaux destinés à préciser le potentiel stratégique du sous-sol en France.

J'ai pris bonne note de votre proposition et vous remercie pour le travail qui a été accompli. Soyez assuré que votre contribution fera l'objet de tout l'intérêt qu'elle mérite.

Je vous prie d'agréer, Monsieur, l'expression de mes meilleures salutations.



Nicolas HULOT

Le rapport du groupe de travail constitué par les Académies des sciences et des technologies pour répondre à cette question a été rédigé dans un délai aussi court que possible pour que ses conclusions puissent être prises en compte à l'occasion de l'élaboration du Plan Climat national et de ses déclinaisons territoriales. Il a été approuvé par l'Académie des technologies le 16 mai 2018 et par l'Académie des sciences le 22 mai 2018.

Avant-propos

En amont des mille et un problèmes techniques, scientifiques, politiques... abordés dans ce rapport, s'imposent les questions générales de l'insertion des sociétés humaines dans le monde minéral et de l'équilibre qui, variable d'un siècle à l'autre, s'est établi entre celui-ci et celles-là. Non pas que nous incluions explicitement cette question dans les pages qui suivent, mais que nous la tenions pour nécessairement présente en filigrane, et qu'elle ne doive jamais être oubliée dans notre réflexion sur la nécessaire éthique sous-jacente lors de nos prises de décisions.

Poissons exceptés, du moins en grande partie, végétaux et animaux vivent, dans leur grande majorité, en étroit contact avec le monde minéral jusqu'à en dépendre étroitement. L'arbre plonge ses racines dans le sol, certains d'entre eux semblant même pousser à partir de la roche. Les insectes creusent leurs galeries dans la terre, tandis que les mollusques empruntent au calcaire de quoi élaborer leur coquille.

Les premiers hominidés n'ont pas échappé à cette antique alliance passée entre le vivant et le minéral, amplifiant sans doute très tôt le nombre de ses points d'interaction et tout autant leur intensité. Le Musée d'archéologie de Saint Germain-en-Laye, entre autres lieux, nous raconte superbement comment nos ancêtres ont tourné cette alliance à leur unique profit, taillant des silex pour en faire des outils, récoltant le kaolin pour fabriquer ses poteries, puisant dans le sol de quoi élaborer des métaux... La suite de l'histoire, nous la connaissons : l'homme ne va plus cesser de

se tourner vers le monde minéral et d'y puiser le schiste de son habitat, la glaçure de ses faïences, la nanoparticule de sa pharmacopée, l'or et le diamant de ses bijoux, le fer de ses épées, le silicium et les métaux rares de son électronique...⁵

Paysage idyllique que celui d'une profusion dans laquelle nous puisons sans retenue pour satisfaire nos fantaisies, notre désir égoïste de pouvoir, notre besoin de plaire, notre volonté de dominer... Idyllique, jusqu'à ce que devant chacun de nous surgisse l'Autre, celui que sa proximité nous fait appeler « le Prochain ». Il est le proche de notre caverne, de notre clan, de notre famille, définition qu'il va falloir bientôt dilater à l'échelle du pays, puis de la planète... Et ce prochain, qui n'est plus vraiment très proche, nous allons nous heurter à ses besoins et à ses désirs qui sont les mêmes que les nôtres, situation qui ne comporte guère, pour nous, que deux issues : ou bien entrer en conflit avec lui ou, au contraire, avec lui partager — dans un mouvement de justice élémentaire — les ressources du sol que nous avons découvertes.

Mais élargir ainsi spatialement la définition du prochain aux confins de la Terre, n'impose-t-il pas de l'élargir aussi dans le temps ? Et donc d'étendre la *Règle d'or* — qui nous enjoint de « ne pas lui faire ce que nous ne voudrions pas qu'il nous fasse » — à celui qui ne partage pas non seulement notre espace, mais aussi notre époque. C'est ainsi que, déclinant au futur immédiat l'obligation que nous fait la *Règle d'or*, nous nous sommes toujours astreints à construire toits ou ponts en sorte qu'ils « tiennent » pour le petit-fils de notre petit-fils. Il nous faut désormais descendre beaucoup plus avant le fleuve du temps et, tenant par extension nos descendants lointains pour des prochains, leur épargner nos déchets, qu'ils soient ajoutés (gaz à effet de serre...) ou soustractions (épuisement

////////////////////////////////////

5 On lira une excellente liste et description des diverses ressources minérales actuellement exploitées dans l'introduction, par Serge Haroche, du cours au Collège de France de Georges Calas [22 janvier 2015].

de la planète par surexploitation...]). Cette perspective relativement neuve doit marquer notre morale politique.

Qui, alors, des siècles ou des millénaires en aval, pourra bien être notre prochain ? La question, vertigineuse, est sans réponse. Il se peut qu'il n'y ait plus, alors, d'humanité. Il se peut que notre descendant, porté par d'immenses progrès techniques et devenu une sorte de surhomme, puisse annihiler d'un geste la nocivité de nos déchets. À l'inverse il se peut que, à la suite de quelque monstrueuse catastrophe, il soit retombé à un nouvel « âge des cavernes », devenu ignorant et sujet, donc, à tous les risques. Nous voici pris d'une inquiétude sans précédent, amenés à inscrire cette troisième possibilité dans nos travaux et à faire en sorte que nos stockages actuels ne puissent lui nuire en cette époque ultra-lointaine.

Sans aller aussi avant dans le futur, l'exploitation de nos ressources en minéraux entraîne des obligations comparables. La *Règle d'or* doit, ici aussi, être invoquée et tout doit être mis en œuvre pour que, dans les siècles à venir, certes, mais aussi au temps présent, notre actuelle exploitation des ressources ne nuise pas. Au-delà d'un vœu, le champ est ouvert aux négociations, aux accords internationaux, aux limitations, aux interdictions, etc.

Tout en rappelant la nécessité de continuer à exploiter le sous-sol pour nos besoins essentiels et tout en décrivant les manières de le faire, on ne peut se soustraire aux problèmes éthiques ci-dessus évoqués ni aux impératifs sociaux, environnementaux, sanitaires, conditions d'exploitation des mines, traitement des eaux, remise en état du paysage, qui se trouvent ainsi soulevés. On pensera là, entre autres, à l'intolérable travail des enfants que l'on oblige à se glisser dans les boyaux les plus étroits pour récupérer des seaux de minerai. La balance entre Nécessité et Impératifs est présente lors de toute action humaine et elle réclame une large coordination entre acteurs concernés. Il en résulte souvent des pistes de recherche et des innovations imprévues au départ. Ainsi

en va-t-il ici, par exemple, des modes d'exploitation et d'extraction, de traitement et d'enrichissement, tous à améliorer ; ainsi que des procédés de récupération qui sont encore loin d'être au point au maximum de leurs possibilités.

Dans tous ces domaines, un effort de recherche pluridisciplinaire (physico-chimie, mécanique, informatique... mais aussi sociologie, voire philosophie) s'avère indispensable.

Chapitre I

Le potentiel en matières premières de notre sous-sol

Les ressources minérales nécessaires à la transition énergétique sur le territoire national continental

En 2016, Emmanuel Macron, alors ministre de l'économie, de l'industrie et du numérique écrivait l'introduction d'un numéro des *Annales des Mines* consacré aux ressources minérales. Parmi les trois leviers identifiés pour sécuriser l'approvisionnement en matières premières stratégiques, outre le recyclage et la diversification des sources, il évoquait « *la création de nouvelles mines en France, de taille raisonnée et obéissant aux meilleurs standards environnementaux et sociaux.* ». Il affirmait ensuite : « *C'est un objectif à notre portée, car le sol français est riche en métaux et minéraux inexploités. Ma conviction est que la France métropolitaine et l'outre-mer a un avenir minier. Pour ce faire, nous devons tirer les enseignements du passé. Dans un contexte d'acceptation locale difficile, les acteurs doivent se montrer irréprochables en termes de transparence et de dialogue avec les populations concernées.* ». Ces propos sont toujours d'actualité, en particulier pour les besoins liés à la transition énergétique. (Annales des Mines, *Responsabilité et Environnement*, N° 82 - avril 2016 - *Les métaux stratégiques, un enjeu mondial ?*)

On peut penser par exemple au lithium, qui est désormais un composant essentiel des batteries, ou aux terres rares, notamment le néodyme et le dysprosium, utilisés dans les aimants permanents des générateurs d'éoliennes.

De nombreux rapports (voir Annexe I) mettent en évidence une croissance continue des besoins en matériaux pour construire ces équipements et la question de l'approvisionnement en matériaux, métaux de base ou en métaux, plus rares, mais déterminants, préoccupe les États et les pouvoirs publics dans un contexte géopolitique tendu, dans lequel les préoccupations sociétales et environnementales prennent un poids de plus en plus important.

La croûte terrestre renferme encore énormément de métaux et l'épuisement de ces ressources, même s'il fait encore débat, n'est pas encore à l'ordre du jour. Par contre, la sécurité d'approvisionnement vis-à-vis de métaux cruciaux pour certaines technologies associées à la transition énergétique est loin d'être garantie à long terme. Les raisons principales sont les suivantes : répartition très hétérogène des ressources à la surface du globe, tensions géopolitiques mondiales ou conflits dans les pays riches en ressources, impacts environnementaux et sociaux non maîtrisés, fluctuations souvent fortes des prix des matières premières. Toutes ces raisons peuvent notablement freiner les investissements pour un développement minier responsable. Enfin, le recyclage, s'il est absolument nécessaire, se heurte encore à des freins structurels et technologiques, et en cas de croissance continue de la demande, ne pourra permettre de satisfaire cette demande.

Chaque État doit donc se pencher sur la sécurité de l'approvisionnement en matériaux (matériaux minéraux, métaux de base et métaux plus rares), pour la transition énergétique mais aussi pour satisfaire l'ensemble des secteurs industriels utilisant des technologies de pointe. Ces réflexions ont lieu au niveau des États (COMES en France), de l'Europe, ou au niveau international (UNEP) — voir réf. 1, 2, 3.

Le présent rapport analyse la disponibilité des ressources minérales présentes sur le territoire national. Le tableau ci-après [4] décrit les métaux nécessaires au secteur de l'énergie. Si l'on met à part l'uranium, et certains métaux nécessaires à l'exploitation des hydrocarbures, la transition énergétique va mobiliser beaucoup de métaux de base ou plus rares.

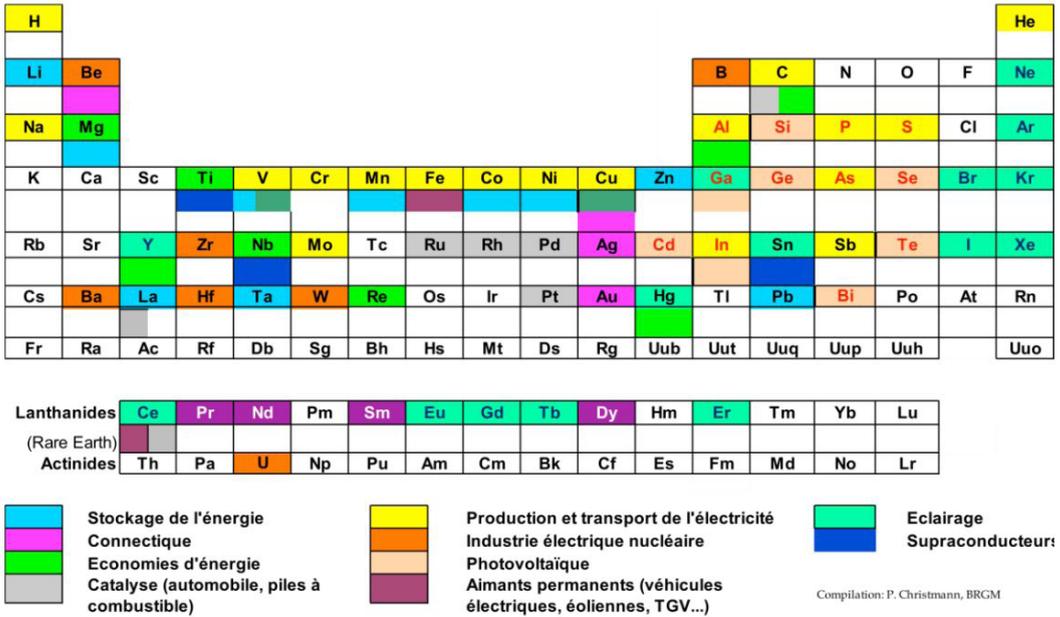


Figure 1 : éléments nécessaires à la transition énergétique

Matières premières nécessaires au secteur de l'énergie d'après [4]

La prévision de la croissance de la demande liée au déploiement de la transition énergétique est cependant délicate, car elle fait appel à des hypothèses. Par ailleurs, les évolutions technologiques rapides et la réduction des cycles de développement et de mises sur le marché, rendent certaines prévisions aléatoires. Enfin en cas de tension sur les prix, ou d'insécurité sur les approvisionnements, la substitution de

certains métaux critiques⁶ est un moteur de l'innovation, en particulier pour les terres rares.

Le diagramme ci-après (Figure 2) [5], même s'il doit être confronté à bien d'autres analyses, donne cependant une idée de l'évolution de la demande pour certains métaux.

La France est parmi les pays européens l'un des mieux dotés en ressources minérales, compte tenu de sa géologie. Des mines métalliques ont été exploitées depuis des temps immémoriaux, mais l'activité minière est actuellement très réduite. Le BRGM entretient pour le compte du ministère en charge de l'industrie un inventaire des indices et cibles priorisés, accessible sur le portail *Mineralinfo*.

Entre ces informations, accessibles et répertoriées, au niveau européen, et une estimation précise et actualisée des ressources, il y a un grand fossé, que l'état des connaissances actuelles ne permet pas de combler.

Les raisons en sont les suivantes :

- les efforts de prospection en France se sont considérablement ralentis et se heurtent à de nombreux freins sociétaux ;
- la connaissance jusqu'à présent compilée ne concerne que des indices reconnus à partir d'anomalies en surface, ou précisées par des sondages existants.

6 Ceci est vrai pour tous les matériaux : par exemple l'apparition des tours en béton pour les éoliennes est liée au renchérissement de l'acier, tout comme la disparition des tambours en acier inox des machines à laver et leur remplacement par des tambours en plastique, etc.

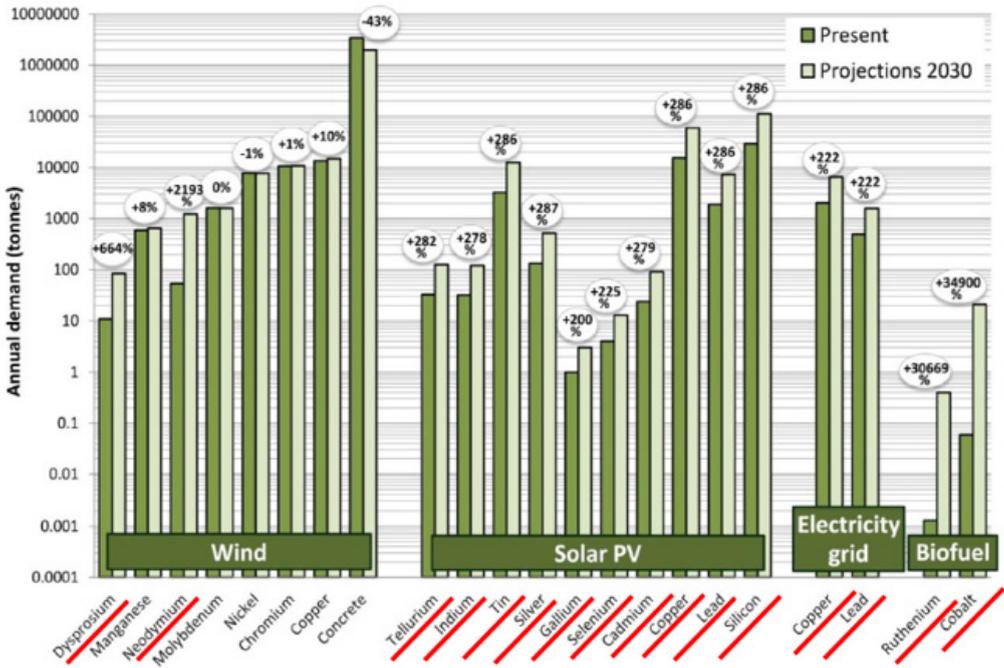


Figure 2 : Demande annuelle en divers éléments

Source The European Innovation Partnership on raw materials - Raw materials - 17/03/2018

Note : à ces besoins pour la production d'énergie, s'ajoutent évidemment les besoins associés aux nouvelles technologies de stockage d'énergie comme le lithium, le cobalt, le manganèse, mais aussi le phosphore, le nickel et le titane pour les batteries, et, à plus long terme, les divers matériaux des piles à combustible. Les volumes de matériaux utilisés pour les biocarburants partent de valeurs faibles et le chiffre présenté n'est sans doute pas significatif.

On peut ainsi affirmer que la connaissance du potentiel minier français se réduit en première approximation aux 500 premiers mètres du sous-

sol. Les formations géologiquement favorables sont enracinées à des profondeurs bien supérieures. La connaissance géologique a énormément progressé. L'intégration des informations issues de la géologie — désormais mieux connue en trois dimensions —, de la géophysique profonde et des indices connus en surface, permet de dresser des cartes dites de prédictivité ou prospectivité, [8, 9] permettant d'identifier des zones favorables.

Pour résumer la situation, et en se concentrant sur les métaux dits critiques pour la transition énergétique, on peut affirmer que la France métropolitaine recèle des ressources **potentielles** non négligeables pour les métaux suivants dans les zones suivantes :

- Li (Massif Central, Massif armoricain, Alpes)
- Cu, Pb, Zn et certains métaux associés : Ge, In, (tous les massifs anciens et certaines formations sédimentaires)
- Sn, Ta, Nb, Be (Massif Central et Massif armoricain)
- Sb (Massif armoricain, Massif Central)
- W (Pyrénées, Massif Central)

En ce qui concerne les terres rares, il y a de nombreux indices, que ce soit en paléoplacers (grès du Massif armoricain, ou granitoïdes différenciés dans le Massif Central).

La Nouvelle Calédonie est évidemment la terre d'élection du nickel, mais le chrome y est aussi assez abondant, tandis que le cobalt est un sous-produit valorisable du nickel (site de Goro), et pourrait être de plus en plus attractif étant donné la progression continue des cours du cobalt, très important à divers titres dans la transition énergétique.

La Guyane est bien connue pour son or, mais les roches très anciennes qui constituent le bouclier guyanais contiennent des indices avérés de Nb, Ta, W, Sn, Li, Ni, Co, ainsi que de platinoïdes [10].

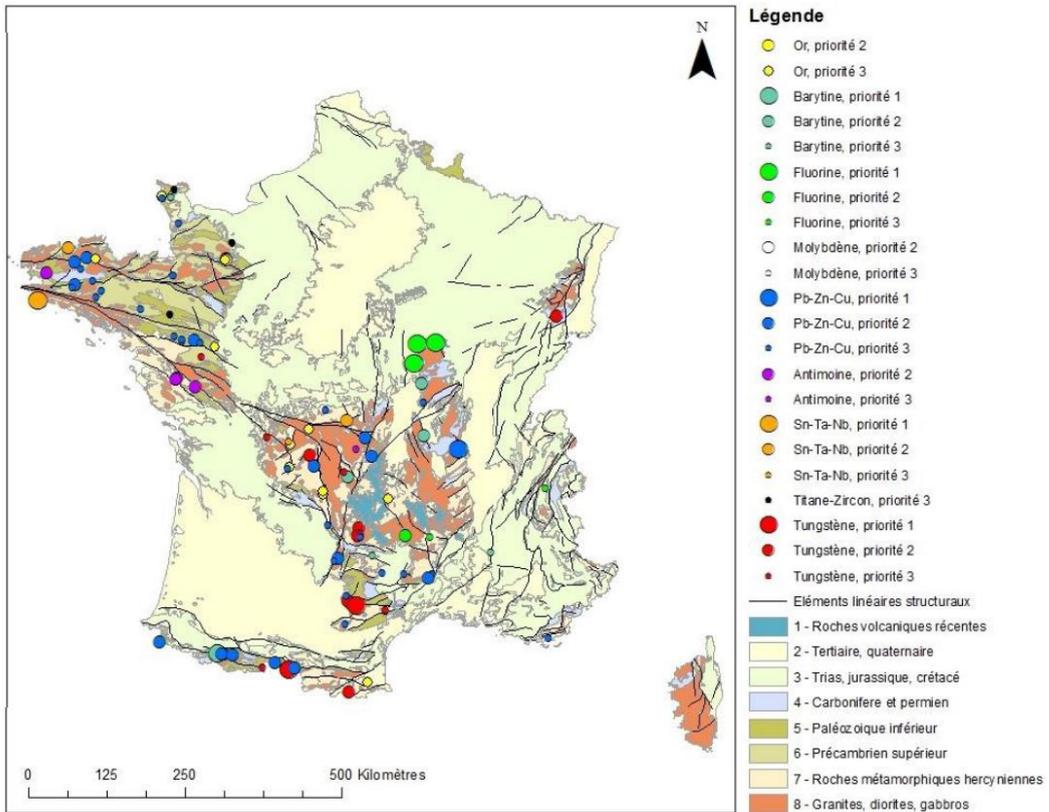


Figure 3 : les 99 cibles minières retenues pour être réévaluées, classées par substance et priorité initiale

Indices classés par priorité en termes d'intérêt, revus en 2015-2016 [Brgm, réf. 11].

Ces ressources ne sont pour la plupart que potentielles, sur la foi des connaissances géologiques, et sur la base d'indices ou de gisements actuellement connus, répertoriés et archivés. Certaines zones font l'objet de permis de recherche. Sur la plupart des indices considérés, il n'a pas été mis en évidence de très gros gisements exploitables dans les conditions économiques actuelles, mais les efforts de prospection sont actuellement très limités.

Le sous-sol français, tant en métropole qu'Outre-Mer, recèle des gisements potentiels, exploités dans certains cas (Ni, Co) en Nouvelle-Calédonie, et Nb, Ta et Li comme sous-produits de l'exploitation de certains gisements de kaolin. Les eaux de la géothermie contiennent de nombreux métaux critiques et en particulier du lithium. Les recherches déjà effectuées et en cours indiquent la capacité d'une extraction sélective des sels (Li₂CO₃, LiCl, LiOH). Un démonstrateur est en préparation. Dans la région de Soultz-Souffenheim, la teneur en lithium est en moyenne de 155 mg/l. Le potentiel serait d'environ 1 million de tonnes⁷. Compte tenu de l'évolution des quantités demandées et des prix, ces recherches doivent être encouragées.

Il existe cependant aujourd'hui des approches qui permettent de mieux cerner les potentialités minières, elles reposent sur :

- une meilleure connaissance en trois dimensions de la géologie, alimentée par des campagnes de géophysique profonde, et par une meilleure connaissance des processus responsables des minéralisations (à toutes les échelles) ;
- l'exploitation géostatistique des données disponibles (anomalies géochimiques, bases de données de sondages disponibles...)
- une capacité accrue de modélisation en 3D des structures géologiques ;
- la capacité d'agréger les connaissances dans des outils prédictifs permettant de dégager des zones ou volumes favorables ;
- une mise en place d'une structure coordonnée et accessible d'archivage et de conservation des échantillons de notre sous-sol terrestre et marin⁸ ;

7 En supposant que la nappe d'Alsace concernée, qui est étendue, contient 6 km³ de volume poreux à la teneur de 155 mg/l, on aboutit à une quantité totale de lithium de 930 000 tonnes. Encore faut-il pouvoir l'exploiter dans sa totalité, ce qui n'est pas garanti...

8 Il s'agit ici de concrétiser le projet CaLiF (carothèque et lithothèque française) porté par le CNRS, le BRGM et le MNHN qui dort, faute de financement et de décision, dans les tiroirs du ministère de la recherche depuis cinq ans.

- la communauté scientifique nationale des géosciences qui souhaite unir ses forces pour progresser dans la connaissance géologique en trois dimensions de notre territoire, à travers le programme Référentiel géologique de la France, RGF [12], dont le premier chantier collectif sur les Pyrénées qui s'achèvera fin 2018 montre toutes les potentialités pour une meilleure connaissance des ressources du sous-sol (eau, énergie, mais aussi ressources minérales). Les prochains chantiers seront probablement les Alpes et le centre du Bassin parisien, qui répondront, outre les enjeux scientifiques, à des enjeux prioritaires en termes d'aménagement et de prévention des risques naturels.

Or, ce sont le Massif Central et le Massif armoricain qui détiennent la majeure partie des ressources minérales potentielles du territoire métropolitain. La communauté scientifique des géosciences conserve donc un intérêt scientifique très fort pour ces deux massifs qui résument des milliards d'années de notre histoire géologique. Il pourrait en être de même pour le bouclier guyanais. Des efforts concentrés et concertés au sein de « chantiers » dédiés permettront de faire très significativement progresser notre connaissance sur les vraies potentialités de notre sous-sol, qui pourraient un jour contribuer à un approvisionnement mieux sécurisé en ressources minérales vitales pour la transition énergétique, sans qu'il ne soit forcément nécessaire au stade actuel de déclencher des programmes d'exploration à proprement parler.

Au-delà des matériaux solides, il existe des sources d'hydrogène dans le sous-sol. Cet hydrogène « natif » peut être émis le long des failles océaniques mais aussi à terre, en particulier dans des bassins intra-cratoniques (un craton est une partie très ancienne d'une croûte continentale, au moins 500 millions d'années). Une faille située dans le Cotentin présente des émissions d'hydrogène natif, qui méritent des recherches résolues.

En résumé, le territoire national (métropole et outre-mer) présente des potentialités pour de nombreux métaux indispensables à la transition énergétique. Les potentialités connues reposent sur une connaissance fragmentaire et proche de la surface (indices et géologie de surface, quelques forages ne dépassant pas 500 m). Pour déboucher sur une quantification des ressources, il est urgent de définir des cibles, d'analyser le contexte économique et social et de développer un récit collectif sur la transition énergétique.

Le développement de méthodes prédictives, alimenté par les connaissances nouvelles acquises lors de grands chantiers mobilisant, de manière concertée et focalisée, la communauté nationale des géosciences à l'image du chantier Pyrénées du RGF, permettra de mieux cerner les potentialités minières réelles de notre sous-sol, notamment au-delà des 500 m de profondeur actuellement pris en compte.

L'empreinte écologique de l'activité d'extraction et de transformation est élevée. La France est autosuffisante pour les matériaux de construction et extrêmement dépendante pour les minerais de métaux. Dans ce dernier cas, la France exporte les pressions environnementales et sociales sur les pays producteurs qui ne disposent pas toujours d'un contexte réglementaire respectueux de l'environnement, du droit des travailleurs et des droits de l'Homme.

Un éventuel redémarrage d'activités d'extraction et de transformation sur le territoire national continental devrait bien évidemment se conformer aux concepts de « mine responsable » fondé sur le fait que la mine doit être conçue pour apporter sur le long terme un bénéfice net optimal aux populations du pays hôte avec un impact social et environnemental minimum. On peut se référer aux travaux entamés en 2015, et récemment publiés, disponibles sur le site www.mineralinfo.fr sur ce thème. L'objectif de cette démarche était de définir le référentiel des nouveaux projets

miniers en veillant, au-delà des obligations réglementaires, à inscrire cette activité dans un projet de territoire et à réduire et prévenir les impacts environnementaux et socio-économiques négatifs.

Quelques références

1. Alliance ANCRE, rapport *Ressources minérales et énergie*, 2015.
2. Angerer *et al.* : Rohstoffe für die Energieversorgung der Zukunft : *Geologie – Märkte – Umwelteinflüsse (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft)*, München 2016.
3. UNEP International Resource Panel, <http://www.resourcepanel.org/>
4. Patrice Christmann, Développement économique et croissance des usages des métaux, *Responsabilité & environnement* - avril 2016 - N° 82, 8-15.
5. EIP : *european innovation partnership on raw materials Strategic Evaluation Report 2016*, Presented to the High-Level Steering Group on 14/07/2016
6. Minerals 4 EU / PROMINE : <http://www.minerals4eu.eu/>
7. MINERALINFO : <http://www.mineralinfo.fr/>
8. Prédicativité/prospectivité : <http://www.brgm.eu/news-media/mineral-prospectivity-conference>
9. http://www.beak.de/beak/en/news_02_nov_2017
10. Hervé Théveniaut, Mario Billa, Daniel Cassard, Claude Delor, Frédéric Maldan. *Le plateau des Guyanes et son potentiel minier*. Comptes rendus *Geosciences*, 2011, pp.60-67 HAL. BRGM.
11. BRGM : réévaluation du potentiel français en ressources minérales, février 2016, BRGM/RP-65165-FR.
12. RGF <http://rgf.brgm.fr/>

Les ressources minérales marines, une ressource stratégique pour la France

(Voir aussi l'Annexe VII)

Depuis les années 1970, la France a été un des leaders de la recherche océanographique grâce aux synergies entre l'Ifremer, le CNRS et les universités. Les découvertes ont été majeures dans tous les domaines, tant en océanographie, géologie, géophysique, biologie qu'en environnement des systèmes vivants. Il est acquis que l'océan et ses marges ont été les lieux de genèse des principales ressources minérales actuellement exploitées sur les continents. Ces phénomènes persistent encore actuellement et renouvellent en permanence la ressource minérale, accumulant au fond des océans des réserves considérables (de quelques dizaines de milliers de tonnes jusqu'à des dizaines de millions voire plusieurs centaines de millions de tonnes de minerais avec des concentrations souvent supérieures à celles des gisements terrestres).

C'est ainsi qu'ont été identifiés les nodules polymétalliques (fer, manganèse, nickel, cuivre...), les encroûtements de manganèse (plus cobalt, platine...), les sulfures hydrothermaux (cuivre, zinc, or, argent...). Ces minéralisations contiennent aussi des métaux nécessaires aux nouvelles technologies et aux énergies renouvelables telles que terres rares, indium, germanium, gallium, sélénium, tellure, etc., sont souvent associées à des sources d'hydrogène natif et de méthane inorganique.

Ces découvertes ouvrent de nouvelles frontières pour la recherche et l'identification de ressources minérales et énergétiques dans les océans. Les ressources minérales marines profondes offrent l'opportunité de combiner recherche scientifique, progrès technologique, valorisation économique, sécurité pour certains métaux et participation à la mise en place collective d'une gestion durable de ce nouvel espace. Les grandes puissances économiques ne s'y sont pas trompées qui sont activement

engagées dans l'exploration et l'exploitation de ces ressources. La Chine, l'Inde, la Russie, les États-Unis, l'Allemagne, le Canada et la Corée du Sud ont récemment débuté d'ambitieux programmes d'exploration centrés sur l'accès aux ressources des grands fonds dans les Océans indien, pacifique et atlantique.

L'accès aux ressources minérales marines peut se faire dans deux contextes juridiques : les eaux territoriales (zone économique exclusive : ZEE) et les eaux internationales. Dans sa ZEE⁹, la France dispose d'espaces profonds dans les trois océans tandis que dans les eaux internationales, elle peut intervenir à travers l'organisation internationale ISA (*International Seabed Authority*), dépendante de l'ONU, qui délivre des permis d'exploration et d'exploitation.

La France dispose du potentiel tant public (Ifremer, CNRS, Université) que privé (Technip, Eramet et Areva-Orano) pour mener à bien les recherches scientifiques et développer les technologies, potentiellement révolutionnaires, pour l'accès à ces ressources minières. Avec les autres grandes nations, la France s'est déjà engagée dans les recherches de ressources minérales sous-marines. Elle a ainsi mené en 2010 une première exploration de la ZEE française autour des îles Wallis et Futuna, associant les organismes publics et les sociétés privées. Elle a aussi obtenu un permis d'exploration (qu'elle doit honorer pour les quinze prochaines années) dans les eaux internationales sur la dorsale médio-atlantique pour rechercher des minéralisations hydrothermales sur 250 000 km². La société française d'ingénierie pétrolière Technip est au premier rang auprès des sociétés Nautilus¹⁰ et Neptune pour réaliser les équipements nécessaires à l'exploitation des minerais sulfurés par grande profondeur.



9 La ZEE française, la deuxième au monde, couvre 11 millions de km² dont 9,6 millions en Outre-mer et avec 96 % de sa surface ayant des fonds supérieurs à 500 m.

10 Les sociétés canadienne (*Nautilus Minerals*) et américaine (*Neptune Minerals*) se préparent à exploiter des dépôts hydrothermaux en Papouasie.

Si la connaissance sur les ressources minérales marines est suffisante actuellement pour les identifier, il reste encore beaucoup à faire pour les explorer et encore plus pour les exploiter, à supposer que cette exploitation se révèle économiquement et techniquement possible à relativement court terme. L'inventaire reste très incomplet. Par exemple, pour les minéralisations sur les dorsales *médio-océaniques*, *les technologies d'exploration permettent uniquement de localiser les sites actifs en cours de formation, à la différence des sites inactifs qui ne peuvent, dans l'état actuel des technologies, être localisés que par des opérations près du fond.* Pour les encroûtements et les nodules qui peuvent se rencontrer sur des surfaces de plusieurs millions de km² à des profondeurs considérables (4 000-5 000 m), la connaissance partielle du mode de concentration et de la localisation des zones les plus riches en éléments rares justifie de progresser dans la connaissance des paramètres géologiques et chimiques qui conditionnent la formation des accumulations les plus riches et les plus facilement exploitables.

Les technologies d'exploitation et leurs coûts sont soit très incertains, soit uniquement connus par segment. Certains des procédés d'extraction sont encore en cours de développement/validation tandis que le stockage, la logistique et les traitements du minerai sont en cours d'étude. Mais c'est certainement sur les impacts environnementaux, leurs conséquences sur le vivant et sur les services rendus à l'humanité que la connaissance est la plus partielle et la plus critique. La France est le seul pays qui ait mené une évaluation scientifique des impacts environnementaux¹¹ potentiels et de leurs conséquences. Ceux-ci peuvent être, à l'échelle de la ressource, considérables.

////////////////////////////////////

11 J. Dymont, F. Lallier, N. Le Bris, O. Rouxel, P.-M. Sarradin, S. Lamare, C. Coumert, M. Morineaux, J. Tourolle (coord.), 2014. *Les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes*. Expertise scientifique collective, Synthèse du rapport, CNRS – Ifremer, 110 p.

Alors que la perspective d'une exploitation prochaine des ressources minérales profondes se précise à l'échelle internationale, on ne connaît que de façon très partielle ces géo-écosystèmes particuliers. Il est donc nécessaire, dans le cadre d'une exploitation potentielle de ces ressources, respectueuse de l'environnement marin, de poursuivre un effort de recherche conséquent afin de mieux appréhender les processus liés au fonctionnement et aux dynamiques des géo-écosystèmes marins profonds. Il est de la responsabilité de la France, pionnière dans la connaissance du milieu marin, de maintenir des capacités physiques, humaines et juridiques de recherche et d'exploration suffisantes pour conserver cette place et ainsi assurer que l'exploitation de ces ressources, qui vont vraisemblablement être indispensables pour construire une société décarbonée, se fasse dans des conditions les plus durables possible tout en assurant à notre pays les ressources technologiques et économiques nécessaires.

Les concentrations en éléments majeurs dans les minéralisations des grands fonds océaniques se répartissent de la façon suivante (% en poids) :

- dans les nodules : manganèse 18,5 %, fer 12,5 %, silice 8,8 % ;
- dans les encroûtements : manganèse 22 %, fer 16 %, silice 4,14 % ;
- dans les sulfures hydrothermaux : soufre 28,8 %, fer 21,44 %, silice 11,5 %, zinc 11,1 % ; baryum 5,8 %.

Les systèmes hydrothermaux océaniques actifs sont distribués le long des failles océaniques.

Chapitre II

Les hypothèses de base sur les technologies et les ruptures potentielles

Quatre familles de technologies essentielles sont principalement à mettre en œuvre dans la transition énergétique. Une description plus détaillée de chacune de ces technologies est donnée en annexe V. Le chapitre suivant contient une évaluation détaillée des besoins en ressources naturelles liés à la production d'énergie solaire, éolienne et au parc de véhicules électrique à construire, car ces trois domaines sont ceux qui induiront des ruptures réelles en termes d'utilisation des ressources naturelles.

Des technologies de production

La production d'énergie solaire

Elle peut concerner la production d'électricité ; les technologies actuellement dominantes dans ce domaine sont celles au silicium mono ou multicristallin. Les évolutions vers les films minces cadmium-indium / gallium-sélénium (CIGS) ou bien cadmium-tellure (CdTe) ainsi que les perfectionnements apportés n'ont pas connu le succès escompté et les cellules à multijonction ou à pérovskites¹² sont encore au stade de développement prometteur.

////////////////////////////////////

12 La pérovskite désigne à l'origine le minéral CaTiO_3 (titanate de calcium). On appelle cellules (photovoltaïques) à pérovskite des cellules de composition chimique plus complexe, mais reprenant une structure cristalline semblable.

Une autre manière de produire de l'électricité est de concentrer l'énergie solaire au moyen de systèmes de miroirs et d'utiliser l'énergie thermique ainsi concentrée pour produire de l'énergie mécanique. L'énergie solaire peut aussi être concentrée et être directement utilisée comme énergie thermique. L'hypothèse prise pour le développement de l'énergie solaire est le développement de la technologie photovoltaïque au silicium.

La production d'énergie éolienne

Les éoliennes transforment l'énergie du vent en énergie mécanique puis en électricité. De multiples technologies existent : à entraînement direct ou multiplicateur dit « à boîte de vitesses », à générateur synchrone ou asynchrone, à rotor enroulé, cage d'écureuil ou bien à aimant permanent. D'un point de vue des ressources naturelles, ce dernier choix est important car il commande l'utilisation ou non de terres rares telles que le néodyme et le dysprosium.

La production d'énergie hydraulique

C'est aujourd'hui et de loin la première source d'énergie renouvelable en France et dans le monde. C'est la meilleure alliée des productions d'électricité intermittentes puisqu'elle est disponible à tout moment pour pallier les baisses dues à l'intermittence. Elle joue un rôle essentiel pour assurer la stabilité du réseau et son redémarrage en cas de black-out.

La production d'hydrogène

L'hydrogène peut être obtenu par électrolyse de l'eau et utilisé comme carburant des piles à combustibles ou comme vecteur de stockage d'énergie (l'électricité nécessaire doit être produite sans émissions de GES). L'hydrogène peut aussi être obtenu de façon « décarbonée » par reformage de biométhane.

Les bioénergies

Que ce soit l'utilisation de biomasse, la fabrication de biocarburants ou la génération de biogaz par digestion des déchets, les bioénergies fournissent une énergie renouvelable et « décarbonée ». Les évolutions technologiques concernent l'amélioration des rendements, que ce soit pour les cultures à destination énergétique ou les rendements du procédé de la digestion. Dans les transports, les biocarburants fournissent une solution de diminution progressive des émissions de gaz à effet de serre par augmentation de la part de biocarburants dans les carburants fossiles, sans modification profonde de l'industrie automobile. La fabrication de biocarburants de diverses générations utilise des catalyseurs variés comme du cobalt, du ruthénium, de l'iridium. La fabrication d'hydrogène utilise également des catalyseurs pour améliorer l'efficacité de l'électrolyse. Les catalyseurs ont un impact déterminant sur l'efficacité des réactions chimiques et donc sur l'économie des processus. La technologie des catalyseurs implique des matériaux très variés plus ou moins difficiles d'accès. L'usage optimal et durable des sols, dont une partie pourrait être dédiée aux biocarburants, mérite une attention particulière pour ne pas créer de rareté des sols agricoles et éviter une compétition entre les surfaces dédiées à l'alimentation et celles utilisées pour les cultures industrielles.

La production d'énergie nucléaire

La France dispose d'un parc nucléaire installé important. La diversité de nos approvisionnements en uranium et la présence sur notre territoire de toutes les étapes du cycle du combustible font que les questions de disponibilités ne se posent pas à l'horizon de temps de la transition énergétique. La sécurité d'approvisionnement du nucléaire est pour l'essentiel due à la possibilité de stocker très facilement plusieurs années de besoins d'uranium naturel, contrairement aux combustibles fossiles. La notion de stock stratégique est mise en œuvre directement par EDF, qui en supporte financièrement la charge.

Des technologies de stockage d'énergie

Mobiles

Le stockage d'énergie est un enjeu majeur de la mobilité électrique. Les moyens de recherche mis en œuvre par les constructeurs automobiles et les États pour améliorer les technologies des batteries sont considérables. Les technologies majoritaires aujourd'hui sont celles des batteries au lithium, que ce soit les batteries lithium-ion, lithium-polymères, lithium-métal, ou de façon plus prospective lithium-air. Elles posent évidemment la question de la disponibilité du lithium, mais aussi du graphite, du cobalt et, dans une moindre mesure, celle du manganèse. Par ailleurs, d'autres énergies, pour l'instant carbonées, mais moins polluantes que l'essence et le diesel actuel, peuvent être aisément stockées. C'est le cas du gaz (majoritairement méthane), qui peut fournir une alternative intéressante notamment pour les véhicules lourds.

Stationnaires de courte durée

Les stockages de courte durée n'ont pas besoin de la performance énergie/poids des stockages mobiles. Les batteries au plomb peuvent être utilisées comme les batteries au lithium, mais on peut aussi considérer des stockages d'énergie mécanique comme les volants d'inertie, ou bien les stockages d'air comprimé. Les stations de transfert d'énergie électricité / hydraulique par pompage (STEP) peuvent aussi fournir un stockage d'électricité de quelques heures.

Stationnaires de longue durée

Il n'existe pas de technologie de stockage de l'électricité de longue durée. Notre pays, avec la disponibilité de son parc hydraulique et de ses centrales nucléaires, a donc un avantage certain dans la mise en œuvre d'une

transition énergétique, où la disponibilité d'électricité pour faire face aux variations des énergies intermittentes va jouer un rôle déterminant. Le gaz, quant à lui, peut être stocké de manière saisonnière ou à long terme, en aquifères salins.

On peut aussi rattacher au stockage des technologies facilitant les opérations de transport et de stockage par transformation rendant interchangeables les énergies, comme les électrolyseurs permettant de transformer l'électricité en hydrogène, les piles à combustibles et les nouvelles formes de mobilité à gaz ou hydrogène.

Des technologies de transport et de régulation des réseaux d'énergie

Elles vont être essentielles dans la gestion de plus en plus complexe des réseaux. Elles n'induisent pas de contraintes notables supplémentaires en ce qui concerne les matériaux.

Des technologies d'utilisation rationnelle de l'énergie

Elles sont essentielles pour optimiser la demande en énergie, éviter les pointes trop importantes, très coûteuses à gérer. Nous ne détaillons pas les besoins en matériaux pour l'utilisation efficace de l'énergie, que ce soit dans le logement, l'industrie ou le transport car celle-ci fait l'objet d'un effort constant, et il n'y a pas de rupture à prévoir en ce qui concerne l'utilisation des ressources naturelles.

Chapitre III

Les scénarios de transition énergétique et les besoins en matériaux associés

(Voir aussi les annexes VI et VIII)

Pour estimer les besoins en matériaux associés aux plans de transition énergétique, sans tenir compte des autres usages, ce chapitre se base sur différents scénarios de cette transition. Ceux-ci ont été synthétisés dans le récent bilan prévisionnel de l'équilibre et de production offre-demande d'électricité en France publié par RTE¹³ focalisé sur l'électricité. Ceci permet de calculer des besoins en puissance électrique installée solaire et éolienne et de prévoir un nombre de véhicules électriques à équiper. Cependant, la transition énergétique concerne tous les vecteurs d'énergie et ne se limite pas à l'électricité.

D'autres énergies et d'autres vecteurs d'énergie peuvent jouer un rôle important comme le gaz, l'hydrogène produit pour stocker l'électricité, et surtout les économies d'énergie. Chaque fois que c'est possible, les besoins en matériaux correspondants sont quantifiés. Par ailleurs, compte tenu de la très grande variabilité des scénarios, les résultats sont à considérer comme des ordres de grandeurs des quantités de matériaux nécessaires

13 Synthèse- *L'équilibre offre-demande d'électricité pour l'hiver 2017-2018* publié par RTE et accessible sur le réseau.

et non comme des valeurs absolues. La plus forte demande en matériaux réside dans le parc de véhicules électriques qui pourrait être mis en place d'ici 2050. Les besoins en matériaux concernent les structures :

- acier, béton, enrochements, aluminium, chrome et nickel ;
- les matériaux pour les catalyseurs d'électrolyse, de piles à combustible, de transformation des biocarburants ;
- les composants de batteries (Ni, Li, CO, Ti, graphite, Mn) ;
- les aimants permanents (terres rares).

Les montants en cause sont très importants, pour les seuls matériaux estimés aux cours actuels. Pour la France, la valeur des matériaux nécessaires à la transition énergétique serait de 164 milliards d'euros (Tableau 3.6).

Des contraintes fortes pèsent sur le lithium, sur le cobalt pour lesquels les besoins annuels, pour le seul programme français en rythme de croisière, excèdent, dans l'état actuel des technologies et des connaissances, les productions mondiales annuelles d'aujourd'hui. Si les moteurs électriques utilisent des aimants permanents, la consommation de certaines terres rares (le dysprosium et le néodyme), de samarium, de cobalt et de l'alliage aluminium-cobalt-nickel devient significative et peut peser sur les choix technologiques en fonction des capacités réelles d'approvisionnement.

Les chiffres ne comprennent pas les matériaux nécessaires pour l'isolation des immeubles et les procédés économes en énergie, et ne comprennent pas non plus la satisfaction de la demande de stockages stationnaires (autres que batteries) comme les stations de pompage, stockage d'air comprimé, électrolyseurs, etc.

Les chiffres donnés concernent le marché français, mais la demande industrielle française peut devenir plus importante que les chiffres annoncés si l'industrie française devient un leader mondial dans l'une ou l'autre des technologies citées et fournit des équipements pour d'autres pays que la France.

Les scénarios possibles

Cinq scénarios ont été décrits par RTE et permettent d’asseoir un calcul des besoins en diverses énergies et en matériaux associés.

- ▷ Scénario OHM : 50 % de nucléaire en 2025.
- ▷ Scénario AMPERE : Réduction du nucléaire au rythme de la production effective d’énergies renouvelables.
- ▷ Scénario HERTZ : Développement de moyens thermiques hors nucléaire.
- ▷ Scénario VOLT : Développement soutenu des renouvelables et évolution du parc nucléaire en fonction des débouchés.
- ▷ Scénario WATT : réacteurs nucléaires arrêtés en fonction de critères techniques.

	Parc 2016	Selon RTE scénario OHM Horizon 2025	Selon RTE scénario AMPERE Horizon 2035	Selon RTE scénario HERTZ Horizon 2035	Selon RTE scénario VOLT Horizon 2035	Selon RTE scénario WATT Horizon 2035	Pris en compte dans les calculs ci-dessous Horizon 2030	Pris en compte dans les calculs ci-dessous horizon 2050
Éolien GW	11,6	24	55	38	38	55	30	30
Solaire GW	6,8	18	41	41	29	41	20	20
Véhicules électriques (millions) Parc final		na	16	16	8	6	6	18

Tableau 3.1 : Les scénarios de transition énergétique considérés

Le propos n’est pas de prendre parti entre ces scénarios, mais davantage d’asseoir une estimation des puissances à construire afin d’estimer les volumes de matériaux nécessaires. En prenant 30 GW d’éolien et 20 GW de solaire en 2030, nous sommes certainement sur la fourchette basse et les chiffres ci-dessus peuvent être sous-estimés d’un facteur 2.

Les besoins en matériaux des nouvelles puissances électriques et stockages installés

À partir des scénarios ci-dessus, et grâce à la connaissance des besoins en matériaux actuels des éoliennes, panneaux solaires, batteries, etc., on peut calculer les besoins en diverses matières premières associés à la mise en place de ces nouvelles énergies. Les chiffres sont rassemblés dans les tableaux ci-dessous qui mettent aussi en perspective les besoins annuels en métaux avec la production mondiale. Ces comparaisons sont données pour fixer les idées sur la taille du défi. L'évolution des technologies, des prix des matières premières et des efficacités d'utilisation peut bouleverser l'équilibre des besoins et des disponibilités d'ici 2050. Le caractère proprement considérable des ressources minérales nécessaires avec les technologies actuelles conduit à penser que ces évolutions technologiques sont à la fois nécessaires et certaines. Dans la suite, les chiffres se rapportent à l'installation en 2030 d'un parc éolien de 30 GW avec stabilité au-delà, et à l'installation d'un parc solaire de 20 GW.

Pour un parc éolien de 30 GW environ en 2030

L'hypothèse adoptée dans les tableaux suivants est de 90 % d'éoliennes terrestres ayant 12 % de moteurs à aimants permanents, et 10 % d'éolienne en mer ayant 100 % de moteurs à aimants permanents. L'augmentation possible du taux de moteurs à aimants permanents en éolien terrestre à un impact sur les chiffres du tableau.

	Pays producteurs principaux (avec leur part mondiale)	Besoins annuels pour une construction annuelle de 3 GW (d'ici 2030) milliers de tonnes	Production mondiale actuelle/ an millions de tonnes de métal	Production européenne actuelle/ an millions de tonnes (y.c. DOM-TOM)	Production France actuelle/ an millions de tonnes (y.c. DOM-TOM)
Acier	Chine (50 %), Europe (12 %)	375	1 630	195,0	14,4
Fer*		66			
Nickel	Philippines (22 %), Russie (11 %), Canada (11 %) France (9 %)	1	1,9	0,2	0,2
Molybdène	Chine (40 %), Chili (23 %)	0,2	227	227	0
Chrome	Afrique du sud (54 %)	1	8,4	0,3	0,3
Manganèse	Afrique du sud (26 %), Chine (17 %), Australie (17 %)	0	18	0,0	0,0
Cuivre	Chine (31 %), Chili (13 %)	9	20	0,9	0,0
Aluminium	Australie (32 %), Chine (25 %)	5	59	2,1	0,9
Terres Rares	Chine (88 %)	0,023	0,1	0,0	0,0
Dysprosium					
Composite	na	35	na	na	na
Béton	Asie (70 %)	1 420			
Granulats	Irr.	500			

* dans la fonte

Tableau 3.2 : Matériaux nécessaires pour un programme éolien de 30 GW

Pour 10 % supplémentaires d'éoliennes offshore vs terrestre, les quantités supplémentaires de matériaux seraient de 207 000 tonnes d'acier, 22 200 tonnes de nickel, 150 tonnes de néodyme et 22 tonnes de dysprosium, avec une économie de 3 600 tonnes de cuivre. De même, dans les chiffres ci-dessus, les éoliennes terrestres ont été considérées comme utilisant 12 % d'aimants permanents comme le parc actuel. Un remplacement de 10 % supplémentaire des éoliennes terrestres par des éoliennes à aimant permanent nécessiterait 20 tonnes de dysprosium, 169 tonnes de néodyme, et permettrait une économie de 3 600 tonnes de cuivre.

L'offshore flottant, même s'il est prometteur, n'est pas considéré dans ces calculs. Sa mise en œuvre diminuerait sensiblement les quantités de matériaux de structures nécessaires qui seraient alors équivalentes par unité de puissance aux besoins de l'éolien terrestre.

Pour un parc solaire de 20 GW environ à l'horizon de 2030

Dans les calculs ci-dessous, on distingue la partie proprement panneaux solaires, *grosso modo* indépendante du type d'installation, et la partie structure, laquelle peut varier du tout au tout selon que les panneaux solaires sont installés sur un toit ou sur une structure *ad hoc*.

	Pays producteurs principaux (avec leur part mondiale)	Besoins annuels pour une construction annuelle de 2 GW (d'ici 2030) en milliers de tonnes	Production mondiale actuelle/an Millions de tonnes de métal	Production européenne actuelle/an Millions de tonnes	Production France actuelle/an millions de tonnes (yc DOM Tom)
Acier	Chine (50 %), Europe (12 %)	200	1 630	195	14,4
Béton (socle)		2 460			
Cuivre	Chine (31 %), Chili (13 %)	8	20	0,9	0
Aluminium	Chine (63 %)	46	59	2,1	0,9
Terres Rares	Chine (88 %)	1,4	0,143	0	0
Verre à haute transmissivité (à moins de 90 ppm de fer)	Irr.	146	72 (Verre plat)	9,8	0,8
Composite	Irr.	38			

Tableau 3.3 : Matériaux nécessaires pour un programme solaire de 20 GW

Les besoins de stockage d'énergie

STOCKAGE MOBILE D'ÉNERGIE

Si on prend en compte une obsolescence de dix ans et une courbe en S de passage de 0 à 100 % de véhicules électriques commercialisés, on arrive à un parc de 18 millions de véhicules électriques en 2050 avec au total 44 millions de véhicules à équiper d'ici 2050. Une durée de vie de dix ans est peut-être une hypothèse excessive. Cela représente, pour une autonomie de 500 km par véhicule, une capacité de batteries de 3,3 TWh. Dans la suite des calculs, nous supposons que c'est l'efficacité des batteries actuelles qui va augmenter et que les performances seront atteintes par des batteries constituées approximativement des mêmes

constituants que les batteries d'aujourd'hui. Ceci peut par exemple être atteint en « dopant » les cathodes en graphite avec du silicium très pur, dont la combinaison avec le lithium donne une charge jusqu'à dix fois supérieure à celle du carbone, mais **de nombreuses technologies alternatives sont à l'étude.**

Les chiffres ci-dessous représentent une moyenne des quatre technologies les plus usitées aujourd'hui.

	Pays producteurs principaux	Besoins annuels pour en régime de croisière, à (2 millions de véhicules par an) (milliers de tonnes)	Production annuelle mondiale (millions de tonnes) de métal	Production européenne actuelle/ an Millions de tonnes (y.c. DOM Tom)	Production France actuelle/ an Millions de tonnes (y.c. DOM Tom)
Lithium	Australie (41 %) Chili (23 %)	46,0	0,031	0,0	0,0
Cobalt	Congo RDC (66 %)	111,5	0,110	0,0	0,0
Nickel	Philippines (22 %) Russie (11 %) Canada (11 %) France (9 %)	173,6	2,25	0,2	0,2
Fer	Chine (50 %) Europe (12 %)	92,0			
Aluminium	Bauxite Australie (32 %) Chine (25 %)	2,2	59,0	2,1	0,9
Phosphore	Chine (52 %)	50,9	261,0	0,0	0,0
Manganèse	Afrique du Sud (26 %) Chine (17 %) Australie (17 %)	271,1	18,0	0,0	0,0
Titane	Australie (30 %) Afrique du Sud (20 %)	98,4	4,2	0,3	0,0
Graphite	Chine (68 %)	120,0	2,5	3,0	0,0

Tableau 3.4 : Matériaux nécessaires pour les batteries d'un programme de véhicules électriques allant vers la fabrication de 2 millions de véhicules par an à partir de 2040

Le tableau 3.4 montre que le besoin annuel de lithium et de cobalt pour notre pays serait supérieur au total mondial extrait annuellement pour chacun de ces métaux et pour l'ensemble de la planète. À ces quantités s'ajoutent 3 080 milliers de tonnes de cuivre à raison de 70 kg par véhicule, pour un montant global, au cours actuel du cuivre, de 18,5 milliards d'euros.

Ce goulot d'étranglement vraisemblable à court terme aura un impact sur le choix des technologies des voitures à moteur électrique. En cas de trop forte tension sur disponibilité et prix du lithium, le développement de piles au sodium pourrait prendre le relais, mais à un horizon de temps assez éloigné (disponibilité du vanadium).

La principale alternative à la batterie est la pile à combustible à hydrogène. La fabrication des piles à combustibles a un fort impact sur la demande de platine. Globalement la filière hydrogène est consommatrice de différents métaux pour les catalyseurs.

Cela signifie que des ruptures technologiques et des modifications significatives des chaînes d'approvisionnement sont à attendre.

STOCKAGE STATIONNAIRE D'ÉNERGIE

Les stockages stationnaires sont destinés à permettre une fourniture continue de puissance électrique à partir de sources intermittentes comme le solaire et l'éolien. Les stockages d'énergie ont plusieurs fonctions :

- permettre l'adaptation à la saisonnalité de la demande et de la production été-hiver. Concernant la saisonnalité, ceci correspond à un stockage moyen de quatre mois environ. L'hydroélectricité de lac (18 GW) permet de produire de l'électricité au moment voulu à condition de gérer avec soin le stock d'eau renouvelé chaque année. Les stockages du type pompage hydraulique ou à air comprimé dans l'aquifère peuvent être utilisés mais sont en général limités à quelques heures à pleine puissance ;
- permettre le lissage des variations météorologiques saisonnières (cf. ci-dessus) ;

- permettre les adaptations aux variations météorologiques à court terme et aux variations journalières de la charge. Ces stockages peuvent être fournis par les batteries et par les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP)¹⁴;
- éviter les microcoupures et chutes instantanées de fréquence. Ceci est assuré traditionnellement par l'inertie du parc de machines tournantes. Si globalement ou localement, le taux de machines tournantes lourdes est insuffisant, la stabilité peut être assurée par des supercondensateurs, des volants d'inertie ou des batteries ;
- pour estimer les besoins de stockage jour/nuit, pour compenser l'alternance, une production solaire doit être capable de stocker 16 heures de production journalière l'hiver et 12 heures de production l'été. Autrement dit, pour une puissance en continu de 1 GW solaire, il faut une capacité de stockage d'environ 12 GWh de batteries. Pour une puissance de 20 GW, il faudrait donc 0,24 TWh de capacité, à comparer aux 3,3 TWh calculés pour les besoins du parc de véhicules électriques. Ajouter 10 % aux chiffres ci-dessus donnerait donc une approximation raisonnable des besoins réels. On peut noter que ce stockage ne compense que l'alternance jour-nuit, et pas la saisonnalité, la variabilité de l'ensoleillement, etc.

Il est très difficile d'estimer les besoins de stockage à long terme d'énergie stationnaire. Le chapitre précédent et surtout l'annexe V fournissent un éventail des technologies disponibles.

////////////////////////////////////

14 La puissance installée en STEP en France est proche de 5 GW/h : Montezic, Grand-Maison, Revin, Super Bissorte, la Coche, Le Cheylas, le Lac Noir. La majorité des STEP françaises fonctionne environ 5 heures à pleine puissance. Elles fournissent un soutien précieux au réseau et opèrent de nombreuses interventions brèves et nécessaires. Seules deux STEP permettent des durées de fonctionnement plus longues : La STEP de Montezic qui peut fonctionner 33 heures à pleine puissance en exploitant la totalité du volume stocké et la STEP de Grand-Maison et Le Verney qui n'est pas une STEP pure, puisque chacun des barrages reçoit l'eau du bassin versant et peut fonctionner une vingtaine d'heure en STEP

STOCKAGE SAISONNIER ET À LONG TERME D'AUTRES ÉNERGIES

Comme les stockages d'électricité saisonniers, voire hebdomadaires, n'existent pas pour l'instant dans la réalité¹⁵, une des solutions est de stocker d'autres énergies facilement transformables, ce qui introduit la question de l'interchangeabilité.

Les technologies de stockage de gaz naturel en aquifères, ou bien en aquifères créés artificiellement ou encore en site épuisé d'hydrocarbures, sont bien connues et utilisées depuis une cinquantaine d'années. Elles sont sûres, d'un rendement convenable (30 % environ de la capacité du stockage est bloquée sous forme de gaz « coussin » qu'on ne peut pas récupérer, mais cette quantité est à considérer sur la durée de vie du stockage, qui se chiffre en plusieurs dizaines d'années). Les stockages en aquifères ont une forte capacité et un débit de soutirage moyen tandis que les stockages en cavités salines ont en général des contenances modérées, mais offrent un fort débit de soutirage. La seule difficulté réside dans la mise en évidence et l'autorisation de nouveaux sites de stockage.

La technologie du stockage d'hydrogène en cavité saline se heurte à des difficultés (de type effets mécaniques de l'alternance remplissage / vidange sur le sel) lors d'une utilisation en cycles courts. Des recherches en cours dans notre pays sont destinées à démontrer la capacité des cavités à supporter les cycles courts qui en ferait de bons candidats au stockage de l'hydrogène.

Le stockage d'énergie en cavité souterraine sous forme d'air comprimé est aussi une solution. L'air est comprimé lorsque l'électricité est disponible et il est utilisé comme comburant dans une turbine à gaz (à haut rendement puisque l'énergie de compression a déjà été dépensée) pour restitution d'électricité aux heures de pointe. Les rendements globaux sont cependant assez médiocres et des systèmes avancés de stockage adiabatiques sont en cours d'étude.

////////////////////////////////////

15 L'électricité *stricto sensu* ne se stocke pas (sauf dans des condensateurs), piles et batteries sont des stockages d'énergie chimique (électro-chimique).

Le stockage de CO₂ dans le sous-sol est envisagé onshore et offshore dans des aquifères ou des gisements épuisés. En France, la géologie permet de créer des sites de stockage de petite et moyenne taille (100 kt CO₂/an à 1 Mt CO₂/an). Le stockage en gisement épuisé pose la question du transfert de responsabilités et le stockage en aquifère n'est autorisé actuellement que pour des opérations pilotes (100kt CO₂/an). Les stockages offshore présenteraient moins de problèmes de perception que les stockages onshore.

La biomasse sous toutes ses formes (biogaz, biocarburants) est stockable sous forme gazeuse ou liquide comme les produits fossiles qu'elle remplacera progressivement.

La chaleur qui représente la moitié de la consommation d'énergie en France et en Europe peut également être stockée à long terme, soit en aquifère, soit dans des massifs rocheux soit dans des cavités généralement sous forme d'eau chaude.

L'augmentation des stockages de gaz, d'hydrogène, de CO₂, de chaleur en souterrain a un impact sur l'usage du sous-sol national. **L'État ne dispose pas actuellement de moyens pour gérer les usages multiples du sous-sol et doit remédier à cette situation.**

Les besoins liés à l'utilisation rationnelle de l'énergie

Dans l'industrie

Sans les besoins en matériaux soient faciles à chiffrer, on peut en première analyse distinguer quatre pistes d'économies significatives :

- des procédés mécaniques plus économes en énergie, variateurs de vitesse, allègement, volants d'inertie, etc.
- des procédés thermiques plus économes en énergie : utilisation des rejets thermiques, élimination des fuites de chaleur, turbinage de vapeur excédentaire, optimisation des fours, etc.

- l'isolation des bâtiments industriels lorsque c'est pertinent ;
- l'amélioration des engins de chantiers et l'arrêt des engins hors utilisation (une perte très significative est liée aux moteurs tournant au ralenti notamment dans les travaux publics et les travaux miniers).

Dans le bâtiment

Dans le bâtiment, les économies d'énergie proviendront de meilleurs moyens de régulation (baisse de chauffage des pièces vides, régulation thermique mieux adaptée) et de meilleurs moyens d'isolation.

En ce qui concerne ces derniers, le développement d'isolants à haute performance, tels les aérogels et les isolants sous vide, peut apporter des solutions nouvelles. En ce qui concerne les isolants plus traditionnels — comme la laine de verre, les laines de fibres naturelles, les panneaux d'isolation par l'extérieur, les minéraux peu denses comme la perlite et la vermiculite expansées — c'est l'accès au sable, source de silice pour le verre et la laine de verre, qui peut aujourd'hui donner des inquiétudes d'approvisionnement.

En effet, bien que le sable soit extrêmement abondant sur Terre, son exploitation dans des conditions économiques, et surtout satisfaisantes pour la préservation de l'environnement, est de plus en plus difficile. L'exploitation des vallées alluviales, des fonds sous-marins et des plages se heurte en effet à des difficultés environnementales bien compréhensibles. De plus, les silices recherchées pour ces applications requièrent un faible taux de fer, ce qui en accentue encore la rareté relative.

Dans les transports

La demande essentielle en matériaux concerne l'allègement des véhicules. Cela nécessite l'utilisation de nombreux plastiques issus du pétrole ou du recyclage, renforcés par des minéraux et parfois par des fibres végétales. À titre d'exemple, un véhicule qui contenait 7 kg de talc en 2010 en contient aujourd'hui 12 kg.

En synthèse

Pour la seule production d'énergie solaire et éolienne, et les batteries nécessaires aux véhicules électriques, dans le scénario considéré, les besoins en matériaux pour la France d'ici 2050 se présentent comme suit :

	Pays producteurs principaux (avec leur part mondiale)	Besoins annuels pour le scénario retenu (Milliers de tonnes)	Production mondiale actuelle/an Millions de tonnes	Production européenne actuelle/an Millions de tonnes	Production France actuelle/an millions de tonnes (yc Dom Tom)
Nickel	Philippines (22 %) Russie (11 %) Canada (11 %) France (9 %)	175	2,3	0,2	0,2
Lithium	Australie (41 %) Chili (34 %)	46	0,031	0	0
Cobalt	Congo RDC (50 %)	111	0,110	0	0
Titane	Australie (30 %) Afrique du Sud (20 %)	98,4	4,2	0,3	0,0
Graphite	Chine (68 %)	120	2,5	3,0	0,0
Manganèse	Afrique du sud (26 %) Chine (17 %), Australie (17 %)	271	18	0	0
Béton et agrégats	Asie (70 %)	4 380			19
Acier	Chine (50 %), Europe (12 %)	575	1 630,0	195,0	14,4
Verre	Irr.	146	72	9,8	0,8
Cuivre	Chine (31 %), Chili (13 %)	17	20	0,9	0
Aluminium	Australie (32 %) Chine (25 %)	51	59	2,1	0,9
Terres Rares	Chine (88 %)	1,4	0,143	0	0
Phosphore	Chine (52 %)	51	261	0,0	0,0
Fer		158	1 630	195	14,4
Chrome	Afrique du sud (54 %)	1	8,4	0,3	0,3

Tableau 3.5 : Matériaux nécessaires à la transition énergétique, hors économies d'énergie et stockages stationnaires

À ces montants s'ajoute le cuivre nécessaire aux câblages et aux moteurs des véhicules électriques, soit 3,2 millions de tonnes ou 19,5 milliards d'euros. Au total, et sous les hypothèses précédentes, le montant en matériaux estimés au cours actuel s'élève à **164** milliards d'euros. Par destination, ce montant se répartit de la façon suivante (en milliards d'euros cumulés d'ici 2050) :

Véhicules électriques	131
Éolien	5,9
Solaire	8,7
Cuivre pour les véhicules électriques	18,5
Total	164

Tableau 3.6 : Cout approximatifs en € des matériaux nécessaires à la transition énergétique (hors stockages stationnaires)

Le coût des matériaux inclus dans les batteries des véhicules électriques peut paraître élevé, mais il porte sur 44 millions de véhicules électriques à fabriquer d'ici 2030¹⁶, soit environ 3 000 euros par véhicule, ce qui n'est pas absurde (on admet que la batterie constituera le tiers du prix du véhicule). On doit ajouter à ce chiffre les 19,5 milliards que représente le cuivre nécessaire aux moteurs et aux câblages et la consommation de certaines terres rares (le dysprosium et le néodyme), de samarium, de cobalt et de l'alliage aluminium-cobalt-nickel-terres rares, si l'usage des aimants permanents se développe.

Le contenu en matériaux des installations solaires et éoliennes est quant à lui plus faible, si on considère les 50 à 100 milliards d'investissements que représentent les quelque 50 GW à installer dans ces énergies. Il faut cependant avoir en tête la chaîne de valeur très complexe de ces énergies.

16 Les calculs ont été faits d'ici 2050, pour atteindre un parc de 18 millions de véhicules électriques, en supposant que tous les véhicules commercialisés à partir de 2040 seront électriques, comme annoncé par le ministre.

Le silicium des panneaux solaires fait par exemple l'objet de nombreuses transformations. Des galets de quartz sont transformés en silicium métal dans des hauts fourneaux, le silicium est ensuite transformé en trichlorosilane, lequel est déposé par voie chimique en phase vapeur sur un barreau de silicium très pur (procédé Siemens). Ce barreau est ensuite refondu dans des creusets réalisés en quartz de haute pureté, et « tiré » en un lingot lui-même découpé en « tranches » à l'aide de cristaux de carbures de silicium ou de diamant. Ces tranches sont ensuite dopées, découpées et encapsulées dans un réceptacle de verre plat à haute transmissivité. La France maîtrise industriellement la première phase de silicium métal et à un moindre titre le procédé Siemens. Le reste des opérations est réalisé dans une large proportion en Chine.

L'industrie de fabrication des éoliennes est quant à elle concentrée entre les mains de peu d'acteurs, les dix premières entreprises représentent 69 % du marché¹⁷.

Vestas	Danemark	13,2 %
Goldwind	Chine	10,3 %
Enercon	Allemagne	10,1 %
Siemens	Allemagne	8,0 %
Sulzon Group	Inde	6,3 %
GE	U.S.	4,9 %
Gamesa	Espagne	4,6 %
United Power	Chine	3,9 %
Ming Yang	Chine	3,7 %
Nordex	Allemagne	3,4 %

Tableau 3.7 : Part de marché des différents acteurs de l'éolien

17 Source : *Energy Digital* - avril 2015 (magazine en ligne).

Les batteries au lithium suivent quant à elles une chaîne de valeur complexe. Les matières premières peuvent venir du monde entier. Ces matières subissent ensuite une phase de raffinage et de transformation avant d'être livrées aux fabricants des anodes et des cathodes qui ne sont pas toujours les fabricants des piles. Les piles proprement dites sont ensuite assemblées. Pour les deux dernières étapes, la Chine, la Corée et le Japon sont largement dominants sur le marché.

Le recyclage

Les batteries au lithium peuvent être recyclées pour récupérer les métaux comme le cobalt, le manganèse, le nickel et le lithium. Le graphite quant à lui est brûlé lors du recyclage.

Les panneaux solaires pourraient en théorie être recyclés pour récupération du verre et du silicium mais l'intérêt de la récupération de ce dernier est à démontrer compte tenu de la nécessité de repasser par toute la chaîne de purification.

Plus classiquement, l'acier, l'aluminium et le cuivre sont des métaux pour lesquels les savoir-faire sont au point avec de très bonnes performances de recyclage à qualités identiques. Ce qui n'est pas le cas du béton, du verre, des plastiques et des matériaux composites dont le recyclage ne permet pas d'obtenir les qualités initiales et qui sont recyclés dans d'autres usages demandant des performances moindres.

Les métaux technologiques comme les terres rares ne sont quasiment pas recyclés, du fait des difficultés techniques, logistiques et surtout des coûts, en comparaison avec la matière première et de l'instabilité de leurs usages (exemple, lampes à luminescence remplacées par les LED avant que la chaîne de recyclage des terres rares ait eu le temps de faire ses preuves).

D'une façon générale, le recyclage ne peut évidemment pas fournir la totalité des besoins d'une industrie en croissance. Si on regarde les véhi-

cules électriques, il faudra tout d'abord trouver les matières premières pour construire les moteurs et systèmes électriques des premiers 18 millions de véhicules, plus les véhicules à fabriquer pendant la durée de vie du parc initial avant de pouvoir bénéficier de la ressource en matières recyclées.

En revanche, pour un pays (la France) ou un groupe de pays (l'Europe) qui n'accède pas aux matières premières (ou ne les exploite pas directement), une politique de « capture » et de gestion de la matière à recycler peut lui apporter les ressources nécessaires à sa croissance. En d'autres termes, en installant les technologies nécessaires à la transition énergétique, la France importerait sous forme de matériel fini de la matière première en abondance, constituant un stock. À la fin de la vie de ces matériels, si une politique et une industrie du recyclage sont en place, elle sera à même de pouvoir fournir la matière pour construire la deuxième génération de ces matériels. Elle sera aussi à même de drainer la matière issue du démantèlement des installations situées à l'étranger. Elle pourra ainsi faire croître son parc de production d'énergie, voire l'exporter, passant ainsi de la dépendance à l'autosuffisance. Le même raisonnement peut être fait au niveau de l'Europe qui importe 98 % de sa matière première.

La nécessité de choix technologiques stratégiques

Les chapitres précédents ont précisé les matériaux métalliques ou autres dont la demande ira croissant avec le développement des technologies associées à la transition énergétique. Beaucoup de ces technologies sont assez récentes et continuent d'évoluer en fonction des progrès et en fonction des coûts et de la facilité d'accès aux ressources considérées. Dans des technologies en évolution, les adaptations sont rapides et les choix technologiques sont assez flexibles.

Il n'y a pas de raison de penser a priori que la demande de matériaux est inélastique, bien au contraire. Ce chapitre analyse les offres de

substitution qui peuvent permettre d'éviter les tensions stratégiques ou, à l'inverse, les secteurs qui paraissent peu élastiques et pour lesquels des possibilités d'extraction sur le sol français donneraient un avantage compétitif à notre pays.

Les terres rares ont été exploitées aux États-Unis (*Mountain Pass*), et en partie transformées en France (procédé Rhône-Poulenc à La Rochelle). Du fait de leur grande dispersion dans les matériaux qui les contiennent, l'exploitation des terres rares exige la manipulation de grandes quantités de matériaux et l'ouverture de grandes excavations à ciel ouvert. Le traitement des terres rares conduit à rejeter des déchets, dont certains sont radioactifs. Ces conséquences environnementales lourdes ont conduit à fermer des exploitations existantes. La Chine a alors développé la production de différentes terres rares à grande échelle (95 % environ de la production mondiale) avec des contraintes environnementales peu exigeantes qui sont actuellement inacceptables en France ou aux États-Unis. Le prix des terres rares produites en Chine est très variable et il est utilisé comme arme stratégique. La France est en fait aujourd'hui extrêmement dépendante de la Chine dans ce domaine.

L'ouverture de nouvelles capacités d'extraction et de transformation respectant des contraintes environnementales satisfaisantes n'est donc pas facile et est actuellement économiquement hors d'atteinte, faute de visibilité sur le futur. Or, parmi les terres rares, le néodyme et le dysprosium sont, comme on l'a vu plus haut, nécessaires à la fabrication d'aimants permanents utilisés dans certains types d'éoliennes ou de moteurs électriques pour les voitures à batteries ou à piles à combustibles.

Il est donc recommandé d'une part de développer des technologies sans aimants permanents (en pratique sans terres rares) et d'autre part de mettre au point des technologies d'élaboration des terres rares qui soient acceptables du point de vue des conséquences environnementales. Il existe des possibilités de sources de terres rares en France, mais dont le caractère économiquement rentable n'est absolument pas démontré à ce

stade et dont l'exploitation, selon les techniques actuellement connues, soulèverait certainement de vives protestations compte tenu de son impact sur l'environnement et de la pollution engendrée.

Le niobium (substitut probable du vanadium dans le futur pour de nombreuses applications) est exploité en quasi-exclusivité mondiale par une entreprise familiale au Brésil. Cette dépendance d'un seul fournisseur n'est pas prudente et conduira à des situations de positions dominantes engendrant de possibles variations fortes de prix. Il existe des possibilités de ressources de vanadium en France (avec les mêmes réserves sur leur caractère économiquement rentable).

Le lithium, dont la consommation peut augmenter rapidement du fait du développement des batteries, est présent principalement en Australie, sous forme de spodumène exploité à ciel ouvert, dans l'Himalaya et dans les Andes (au Chili, en Argentine, et potentiellement en Bolivie dans le salar d'Uyuni). Dans les Andes, le lithium est exploité à partir des saumures pompées à travers la croûte de sel et évaporées naturellement dans des bassins. Cette exploitation nécessite des quantités significatives d'eau douce, or les plateaux andins ont des ressources hydriques très limitées et les nappes phréatiques sont sensibles. Les solutions technologiques permettant une exploitation du lithium rentable et respectueuse de l'environnement ne sont pas encore disponibles à grande échelle. Un nouveau procédé Eramet pour les saumures utilise un échange sur résines qui retient les ions Li^+ . Après l'échangeur, la saumure est réinjectée et le chlorure de lithium est récupéré et traité. Les solutions acceptables d'un point de vue environnemental sont à adapter aux différents types de gisements identifiés.

Par ailleurs, les émissions de gaz à effet de serre de ces types d'exploitation sont notables. Malgré la pression mondiale, il est peu probable que l'ouverture de nouvelles exploitations puisse être suffisamment rapide pour que la demande croissante de lithium soit satisfaite sans que continue l'augmentation significative des prix à court terme et sans de fortes

rivalités entre les pays producteurs. En France, les eaux de la géothermie contiennent de nombreux métaux critiques et en particulier du lithium. Les recherches déjà effectuées et en cours développent la capacité d'une extraction sélective des sels (Li_2CO_3 , LiCl , LiOH). Un démonstrateur est en préparation.

Dans la région de Soulz-Soufflenheim, la teneur en lithium est en moyenne de 155 mg/l. Le potentiel serait d'environ 1 million de tonnes, si le lithium pouvait être extrait de toute l'eau contenue dans la nappe de Soulz-Soufflenheim. Compte tenu de l'évolution des quantités demandées et des prix, ces recherches doivent être encouragées. S'il n'y a pas de stratégie industrielle alternative possible, le lithium peut devenir potentiellement source de conflit, comme l'a été le pétrole. Le développement rapide des batteries au lithium pose la question de la durée de vie des batteries et du recyclage des composants rares. Il est recommandé de développer des technologies de batteries sans lithium ou en consommant moins.

Le nickel est abondant en Nouvelle-Calédonie (qui dispose d'une part majeure des réserves mondiales) où il est exploité par la filiale SLN du Groupe Eramet depuis très longtemps. Le nickel de haute pureté est produit par Eramet dans l'usine de Sandouville en métropole.

Le cobalt utilisé en particulier pour les électrodes des batteries est un sous-produit possible du nickel de Nouvelle-Calédonie. Actuellement 60 % du cobalt mondial est fourni à partir de la République démocratique du Congo dans des conditions d'extractions dommageables.

Le béton. Les éoliennes au sol et les fermes photovoltaïques ou solaires thermodynamiques consomment des métaux, mais peu de béton. En revanche, les éoliennes marines posées sur le fond demandent des infrastructures lourdes parfois gravitaires utilisant du béton, car celui-ci résiste particulièrement bien à la corrosion marine. On utilise plus fréquemment des mono pieux ou des structures métalliques. La consommation de béton par MW installé est plus élevée que pour la plupart des centrales thermiques (gaz ou nucléaire). Par exemple, les installations marines

situées en Manche utilisent environ 3 500 à 4 000 tonnes de béton par MW installé, les installations à terre utilisent 200 à 450 tonnes de béton par MW installé alors qu'une centrale à gaz à cycle combiné utilise une dizaine de tonnes de béton par MW installé et une centrale nucléaire de 1 300 MW ou un EPR 1 650 MW utilise environ 600 tonnes de béton par MW installé.

La rareté concerne les agrégats et le sable dans les zones d'estuaires où sont fréquemment placées les fermes éoliennes. C'est le cas au large de Fécamp et Dieppe, dans l'estuaire de la Somme ou dans l'estuaire de la Loire. L'exploitation du sable de mer perturbe les dépôts sableux sur les plages et peut conduire à les éroder, même à distance. Il n'y a généralement pas de possibilité d'ouvrir des carrières à proximité pour concasser des roches convenables pour fabriquer des agrégats à béton ou des enrochements de protection. Cette rareté peut conduire à une augmentation des prix et à des importations lointaines associées à du transport maritime.

La transition énergétique se développe dans une effervescence de transformations technologiques qui consommeront des matériaux jusqu'ici peu utilisés, présents en très faible quantité dans l'écorce terrestre et généralement actuellement très difficilement recyclables. Le développement de l'exploitation de ces matériaux provoque dans la plupart des cas des conséquences environnementales jusqu'à présent peu maîtrisées. Chaque technologie est dépendante non seulement des progrès qui la concernent, mais aussi de l'accès aux matériaux constitutifs dans des conditions économiques et environnementales acceptables (cette dernière contrainte peut en augmenter significativement le coût de production).

Les métaux rares et les terres rares sont aujourd'hui très largement monopolisés par la Chine, après l'abandon de leur exploitation en Occident (par les États-Unis notamment) du fait des contraintes environnementales, ce qui constitue une menace géopolitique majeure pour le futur.

Interprétation de la comparaison des besoins aux productions et ressources disponibles

Les chiffres résultants des calculs ci-dessus montrent que des modifications technologiques, ou bien des modifications dans les quantités de réserves et de ressources minérales, doivent intervenir pour que la transition soit possible. Or, historiquement, ces transitions ne sont pas du tout impossibles. Chacun connaît la fulgurance des évolutions technologiques, qui veut que des technologies réputées de pointe soient balayées du jour au lendemain par des technologies plus économes en ressources et/ou en main-d'œuvre. On connaît moins le fait que les réserves minérales s'adaptent aussi sous l'effet de la recherche minière et de l'évolution des prix de marché.

Le ratio réserves prouvées / production annuelle des ressources minérales. Faits stylisés et explication

Rappelons que la notion de **réserve** est une notion économique et non géologique. Il s'agit des quantités de minerai : 1) découvertes et 2) exploitables économiquement aux prix et aux techniques actuelles. Les gisements découverts, mais dont les coûts d'exploitation avec les techniques actuelles seraient supérieurs aux prix de marché, sont classés en « **ressources** ».

Autrement dit, les réserves augmentent avec :

- 1) le progrès technique qui abaisse les coûts d'extraction ;
- 2) la hausse des prix ;
- 3) l'exploration minière.

Quant au taux de recyclage potentiel, il augmente avec le prix de la matière fraîche et avec le progrès technique, qui abaisse les coûts de collecte et de raffinage du métal secondaire.

De plus, les réserves peuvent être limitées par des réglementations d'accès à ou d'exploitation de la ressource¹⁸. Enfin, la réduction des pollutions et autres atteintes environnementales de l'industrie minière, toutes choses égales par ailleurs, augmente ses coûts. L'action sur les réserves est ambiguë, car les coûts poussant les prix, elles peuvent augmenter, ainsi que le taux de recyclage.

Face à des perspectives de croissance de la demande, la « rareté » des réserves se mesure par le rapport R/P : (réserves / production annuelle actuelle), qui s'exprime en années de vie des réserves.

Comme expliqué en Annexe VII, il est nécessaire de prévoir la dynamique de ce rapport R/P face à une augmentation de la demande. Pour cela, il faut expliquer cette dynamique à partir du comportement rationnel des firmes minières, qui collectivement constituent et détiennent le portefeuille de ressources et donc de réserves. Il faut disposer d'un « modèle d'exploration ».

Pour des raisons expliquées plus en détail en annexe VIII, les firmes minières, quand elles détiennent déjà un portefeuille de réserves de l'ordre de, par exemple, trente ans, n'ont aucun intérêt à continuer de poursuivre l'exploration. En effet l'investissement, qui risque de ne donner des *cash-flows* supplémentaires que dans trente ans, ne sera pas rentable. Le portefeuille total ne dépassera donc pas trente ans, mais se maintiendra à ce niveau, quelle que soit la croissance de la demande et de la production à laquelle il s'adapte.

Il apparaît que le rapport R/P pour de nombreux métaux, mesuré depuis les années 1950 ou 1970 :

- descend très rarement en dessous de 30 ans ;

////////////////////

18 La question des réglementations de l'accès au sous-sol sur lesquelles la France est en avance, peut s'étendre à d'autres régions productrices de métaux et changer la donne économique. Certains pays ont aussi interdit l'accès à leur sous-sol (Colombie) et dans d'autres les populations sont sous pression (Pérou). Les réglementations, sans nécessairement interdire, peuvent renchérir l'exploitation. Les contraintes peuvent aussi être politiques, voir la Chine et les terres rares.

- présente, sauf exception, un rapport écart type/moyenne modéré ;
- est généralement plus élevé pour les minerais présents en grands gisements sédimentaires (fer, bauxite, phosphates) que pour les gisements en filon ou amas (beaucoup de métaux non ferreux) ;
- et ceci tandis que la production annuelle a été multipliée par des facteurs allant de 2 à 100 entre le début et la fin de la période de mesure du rapport R/P.

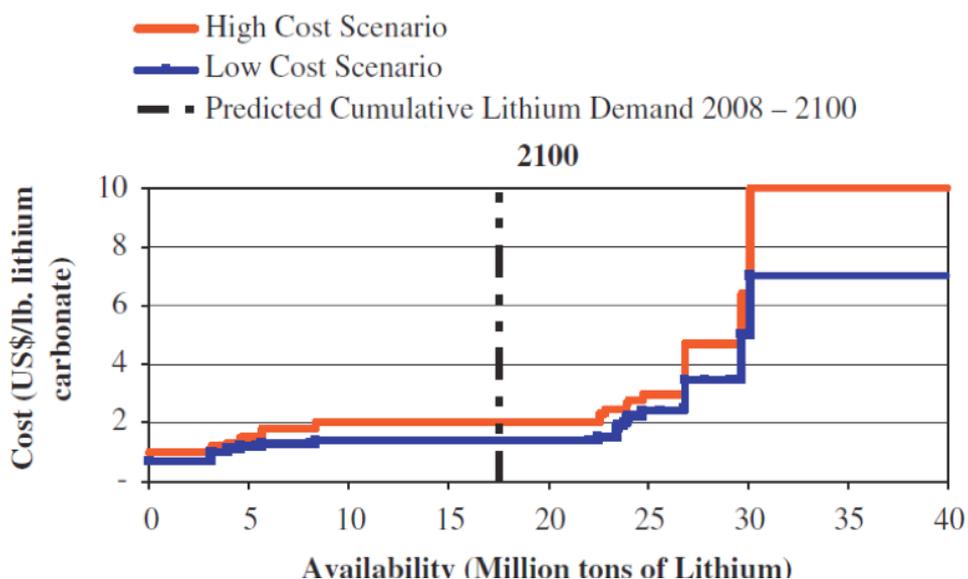
Le cas du cuivre, qui suscite des inquiétudes étant donné la forte augmentation prévisible de sa demande, est très illustratif. De 1950 à 2015, la production mondiale a été multipliée par 8, la moyenne des rapports R/P est de 40 ans avec un écart type de 7 ans et le prix est nettement décroissant.

L'évolution des prix

La question principale pour les minerais est celle de la tendance à long terme de leur prix. La tendance à long terme du prix dépend :

- de la pente de la « *courbe d'offre à long terme* » ou « *reserve availability curve* ». Cette courbe : réserve cumulée en abscisse, coût d'extraction marginal de ces réserves en ordonnée, classe donc les réserves par coût d'extraction croissant. Voir l'exemple du lithium ci-après ;
- de la « *production curve* » qui détermine pour une année donnée le coût de la dernière tonne produite en fonction de la demande annuelle ;
- du progrès technique dans l'extraction et le traitement du minerai.

Dans le cas du lithium, compte tenu du caractère très plat de la *reserve availability curve*, avec les techniques actuelles, un simple doublement des prix assure des réserves pour plus de 100 ans, compte tenu de la croissance de la consommation. Cependant, le prix baissera probablement sous l'effet du progrès technique, toujours vigoureux dans l'industrie minière car la compétition y pousse à la réduction des coûts.



Courbe de disponibilité cumulée pour le lithium. D'après Yaksic et Tilton (2009). Sur l'axe vertical, les coûts sont exprimés en USD par livre de carbonate de lithium. 1 lb est 0,45359237 kg.

En conclusion, les ressources minérales, dites épuisables, peuvent donc être considérées comme inépuisables à l'horizon d'un siècle, tandis que certaines ressources renouvelables essentielles et les milieux qui les supportent, tels que les sols, les forêts primaires, l'océan, l'atmosphère, sont aujourd'hui partiellement détruits par dépassement de leur capacité à recycler nos déchets. Ce qui engendre une destruction de la biodiversité.

Conclusion

La transition énergétique telle qu'envisagée nécessitera des quantités de matières premières très importantes pour les seuls besoins français, dont le coût cumulé d'ici 2050 n'est pas très éloigné de celui des importations de pétrole qui seraient nécessaires si cette transition n'avait pas lieu. L'étude des matériaux nécessaires montre que les situations de pénurie de nature à empêcher cette transition sont peu probables.

Des tensions ponctuelles sur les prix, qui pourraient avoir des conséquences négatives pour le commerce extérieur ou l'économie de la France, sont par contre peut-être inévitables. Le sous-sol national contient quant à lui des matériaux qu'il convient d'inventorier pour identifier ceux qui peuvent faire l'objet d'une exploitation satisfaisante au plan économique et au plan de l'environnement et de la santé.

On peut à ce stade considérer que cette transition peut constituer une opportunité de développer la recherche, l'industrie extractive et l'industrie des énergies nouvelles en France. Les propositions faites par le groupe de travail et rappelées dans le résumé exécutif et les recommandations en début de rapport poursuivent ce but.

Composition du groupe de travail

- ▷ Olivier Appert, *ancien président-directeur général de l'IFPEN, Académie des technologies*
- ▷ Patrick Buffet, *ancien président-directeur général d'Eramet, Académie des technologies*
- ▷ Marie-Lise Chanin, *Académie des sciences, Académie des technologies*
- ▷ Pierre-Noël Giraud, *professeur d'économie, École nationale supérieure des mines Paris et université Paris-Dauphine, Académie des technologies*
- ▷ Bruno Goffé, *directeur de recherche émérite du CNRS, université Aix-Marseille, ancien directeur des sciences de la Terre au CNRS-INSU*
- ▷ Claude Jaupart, *Académie des sciences, Institut de physique du Globe de Paris*
- ▷ Philippe Mallard, *directeur branche exploration-production, Total*
- ▷ Ghislain de Marsily*, *professeur émérite de géologie appliquée à l'université Pierre-et-Marie-Curie, Académie des sciences et Académie des technologies*
- ▷ Isabelle Moretti, *directrice des technologies, ENGIE*
- ▷ Yves Quéré, *Académie des sciences*
- ▷ Didier Roux, *ancien directeur de la recherche et de l'innovation, Groupe Saint-Gobain, Académie des sciences et Académie des technologies*
- ▷ Thierry Salmona, *conseiller du président d'Imerys*

- ▷ Bernard Tardieu*, *président d'honneur de Coyne et Bellier, Académie des technologies*
- ▷ Pierre Toulhoat, *directeur général délégué, directeur scientifique du BRGM, Académie des technologies*

* coprésidents du groupe de travail

Coordination éditoriale

- ▷ Jean-Yves Chapron, *directeur des publications de l'Académie des sciences*
- ▷ Cécile Gibaud, *adjointe au directeur des publications de l'Académie des sciences*

ANNEXES

ANNEXE I

Documents sur les matériaux de la transition énergétique

La question de la disponibilité des matériaux nécessaires à la transition énergétique n'est pas nouvelle, et a déjà fait l'objet de nombreux rapports, sans parler de la mise en garde du Club de Rome dès 1972 (*Halte à la croissance*).

Parmi les plus récents, on peut citer :

- ▶ le rapport de 2017 de la Banque mondiale (*Le rôle croissant des matières minérales dans un futur à faibles émissions de carbone, voir Annexe V*),
- ▶ un rapport de 2016 de l'OPECST (*Les enjeux stratégiques des terres rares et des matières premières stratégiques et critiques, voir annexe II*),
- ▶ un article de 2016 de l'Europe (*La stratégie européenne des matières premières, voir Annexe III*),
- ▶ un rapport de 2017 des académies allemandes Acatech et Leopoldina (*Exploitation minière pour la transition énergétique, voir Annexe IV*)
- ▶ un rapport de mars 2018 (*Raw materials for the energy transition*),
- ▶ un colloque ressources du Collège de France du 4 juin 2015 où Total a présenté sa stratégie industrielle (*Analyse de la criticité des métaux rares dans les applications industrielles : l'expérience des filiales de Total*),
- ▶ le récent livre du journaliste Guillaume Pitron (*La Guerre des métaux rares*, 2018, éditions LLL),
- ▶ le rapport du groupe « Sol et sous-sol » de l'Alliance Ancre, *Ressources minérales et énergie* (juin 2015).

ANNEXE II

Rapport de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques

- ▶ Les enjeux stratégiques des terres rares et des matières premières stratégiques et critiques http://www.assemblee-nationale.fr/14/rap-off/i3771-tl.asp#P2166_387552 19 mai 2016

Propositions

- 1.** Définir une politique minière pour la France reposant sur l'identification des besoins et des ressources, la relance de la prospection, la réalisation d'un nouvel inventaire minier et une réflexion sur la mine moderne et responsable.
- 2.** Définir une stratégie des terres rares et des matières premières stratégiques et critiques, comme l'ont fait la Suède, la Finlande et le Japon.
- 3.** Développer la filière minière française, qui est essentielle pour son impact industriel et économique, et sa contribution à l'emploi, à la croissance et à l'innovation.

- 4.** Sécuriser l'approvisionnement des matières premières stratégiques et critiques par une coopération internationale active.
- 5.** Envisager le stockage des matières premières stratégiques et critiques les plus sensibles.
- 6.** Développer le recyclage et la recherche de produits de substitution aux matières premières stratégiques et critiques.
- 7.** Aboutir au niveau européen à une harmonisation des législations sur les transports de déchets, afin de faciliter leur recyclage.
- 8.** Financer davantage les travaux de recherche sur les terres rares et les matières premières stratégiques et critiques, afin qu'ils aient des retombées significatives. Déterminer clairement les financements envisagés dans la programmation de l'ANR et du PIA. Améliorer leur complémentarité avec les financements européens.
- 9.** Relancer la formation aux activités minières, notamment au sein de l'enseignement supérieur français, à ses différents niveaux, afin de permettre le maintien et le développement d'un savoir-faire particulièrement précieux.
- 10.** Développer la veille économique, réglementaire et médiatique sur les matières premières stratégiques et critiques.
- 11.** Charger le BRGM de mieux identifier les besoins en matières premières stratégiques et critiques et de définir les modalités techniques et financières d'un stockage. Lui confier une mission d'observation des terres

rare et des matières premières stratégiques et critiques, pour améliorer la connaissance de la réalité française, européenne et mondiale, et faire de la veille technologique.

12. Créer au niveau européen, à l'image du JEBIC japonais, une banque d'investissement public qui aiderait les entreprises européennes à investir à l'étranger pour obtenir des produits à des prix stables, et à sécuriser leur approvisionnement à long terme en matières premières critiques telles qu'elles sont définies dans la liste européenne.

13. Développer la coopération internationale pour mesurer et maîtriser l'impact environnemental de la prospection et de l'exploitation des mines et des ressources marines profondes.

14. Renforcer les moyens de l'Ifremer afin qu'il puisse s'engager pleinement dans une coopération avec le Japon dans la recherche et l'exploitation des ressources marines profondes, notamment dans la zone Asie-Pacifique où la présence de la France est très importante.

ANNEXE III

L'Europe

« La sécurité d'approvisionnement en matières premières non énergétiques et non agricoles constitue un sujet d'importance pour l'Europe dont les industries, qui sont au cœur de la place économique qu'elle occupe dans le monde, sont très majoritairement alimentées par des importations. Si, par le passé, l'accès aux matières premières était relativement aisé, la situation actuelle est plus incertaine. Faire face à ces défis nécessite le développement d'une stratégie à long terme.

C'est l'objectif de la stratégie européenne des matières premières, intitulée « Initiative Matières premières ». Cette stratégie s'est incarnée dans une série d'actions plus spécifiques couvrant l'innovation (avec le Partenariat européen d'innovation sur les matières premières), la recherche et le développement (avec un thème dédié aux matières premières dans le programme de recherche et développement européen Horizon 2020) et, enfin, le triptyque Éducation/Recherche-Innovation/Entrepreneuriat (avec le lancement d'une Communauté de l'innovation et de la connaissance (KIC) sur les matières premières). Cet ensemble correspond à un effort financier considérable, de plus d'un milliard d'euros de financement communautaire sur la période 2014-2020. »

Gwenolé COZIGOU

*Directeur transformation industrielle et chaînes de valeur
avancées — Commission européenne*

- ▶ La stratégie européenne des matières premières (*Responsabilité & Environnement* – n° 82 – avril 2016).

Monsieur Cozigou a été auditionné par le groupe de travail.

ANNEXE IV

Rapport des académies allemandes Acatech et Leopoldina — Exploitation minière pour la transition énergétique

Février 2017

Recommandations

Instaurer une loi sur les gisements, qui oblige les entreprises à divulguer certains renseignements.

Promouvoir un réseau européen de connaissance des matières premières (réseau européen d'intelligence minérale).

Accroître le soutien de la part de l'Union européenne pour *EuroGeosurveys* (Association des services géologiques européens) et mise à jour de l'initiative des matières premières de l'Union européenne (EIP Raw Materials).

Réunir les bases de données géologiques relatives aux matières premières minérales des services géologiques nationaux.

Mettre en place un Groupe d'étude international sur les métaux stratégiques pour l'économie et les *HighTech*.

Renforcer l'enseignement et la recherche universitaire et non universitaire.

Renforcer l'expertise des services géologiques des Länder sur les métaux précieux.

Mettre à jour de l'accord de coalition de la 18^e législature implémentant la surveillance des matières premières.

Élaborer des normes de recyclage techniques efficaces pour les groupes de produits particulièrement pertinents pour les ressources minérales critiques.

Faire acquérir par les autorités des compétences en matière de recyclage, semblables aux autorités minières.

Créer des systèmes plus conviviaux de collecte.

Développer le leasing (crédit-bail) pour les appareils électroniques.

Renforcer l'inspection et les contrôles à l'exportation des déchets au plan paneuropéen.

Développer des systèmes de nomenclatures/tarififications douanières pour distinguer entre les exportations de produits neufs et usagés.

Confier l'exportation de déchets électroniques à des entreprises de recyclage spécialisées et certifiées.

Améliorer les procédés de récupération de métaux à partir de produits complexes et de haute technologie.

Élaborer des normes/labellisations de produits conçus pour être recyclables.

Créer une entreprise financée par l'État allemand pour gérer les matières premières stratégiques, pouvant agir au niveau international, éventuellement à contre-cycle.

Maintenir la capacité d'exploitation des mines grâce à des aides d'État.

Mettre à niveau les efforts de recherche sur les gisements de matières premières en Allemagne et en Europe pour l'exploration et le traitement (pour les métaux non ferreux et leurs éléments dérivés, ainsi que des métaux précieux).

Créer un fonds européen pour les matières premières critiques.

Intensifier la recherche sur les ressources marines.

Mettre en place des incitations financières vers l'industrie pour l'extraction des ressources marines.

Couvrir des risques politiques et économiques les projets relatifs aux métaux précieux à l'étranger.

Promouvoir l'exploration.

Créer des incitations au stockage pour l'industrie de haute technologie utilisant des métaux critiques (en développant des approches de type « assurantiel », financées par les *end-users*).

Relancer la recherche et développement pour l'exploration, le transport et le traitement.

Renforcer les coopérations techniques bilatérales.

Introduire une taxe sur les ressources.

Mettre en œuvre une gouvernance globale des ressources.

Instituer une fonction spécifique pour la politique allemande de matières premières, par exemple, un Secrétaire d'État ou un Secrétaire d'État aux matières premières ou un représentant pour les matières premières au niveau de la Secrétaire d'État.

Établir et promouvoir des mécanismes de transparence dans les chaînes d'approvisionnement des matières premières.

ANNEXE V

Analyse critique du rapport de la Banque mondiale : Le rôle croissant des matières minérales dans un futur à faibles émissions de carbone

En partant des données de l'IEA (Agence internationale pour l'énergie) et d'autres entités internationales comme l'ICMM (Conseil international sur la mine et les métaux), la Banque mondiale a publié ce rapport en juillet 2017.

L'étude décrite dans ce rapport consiste à analyser, dans le cadre de l'objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre, l'impact des technologies à mettre en place sur les besoins et le marché en matières premières minérales. Le sujet étant large, les auteurs de l'étude ont choisi de restreindre le périmètre aux besoins spécifiques de matières métalliques dans les technologies liées aux énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne à terre et en mer, l'énergie solaire, mais aussi aux technologies faisant appel au stockage d'électricité comme les batteries.

Avec l'objectif de réduction des gaz à effet de serre à l'horizon 2050, le développement des énergies renouvelables va prendre une part de plus en plus importante dans le mix énergétique, passant de 17 % aujourd'hui à 44 % en 2050 selon le scénario 2 °C de l'IEA. Cette forte accélération va se traduire par une augmentation de l'activité industrielle autour des technologies à mettre en place avec, en parallèle, un fort impact sur les besoins en matières minérales.

Implication des objectifs de réduction des émissions de carbone sur la demande en matières métalliques

Le rapport stipule bien que le périmètre étudié est assez réducteur en termes de domaine d'application (domaines non considérés : les réseaux de distribution, l'efficacité thermique des habitations, l'allègement des véhicules...), mais le but est avant tout de sensibiliser l'opinion aux questions posées par certains éléments métalliques et au rôle économique qu'ils pourraient jouer dans le futur sur les marchés d'approvisionnement. Pour chacune des technologies étudiées et à partir d'une recherche bibliographique, une liste des matières minérales, dont l'utilisation est considérée comme importante dans ce contexte, a été établie.

Énergie éolienne

Aujourd'hui deux technologies sont utilisées avec chacune ses domaines d'application, ses mérites techniques et ses propres besoins en métaux :

- turbines à entraînement direct, technologie fiable, relativement plus coûteuse, en général utilisée pour les éoliennes en mer. Cette technologie nécessite l'utilisation d'aimants permanents contenant des terres rares (néodyme). Avec le développement des fermes offshore, la part de cette technologie devrait augmenter d'ici 2050 avec des besoins de néodyme évalués entre 50 000 et 400 000 tonnes cumulées alors que la production actuelle est de 7 000 tonnes/an ;
- turbines à entraînement via une boîte de vitesses, technologie actuellement la plus répandue, meilleur marché, mais qui demande plus de maintenance, principalement utilisée à terre. Pas besoin d'aimant mais demande une grande quantité de cuivre.

Les principaux métaux concernés pour couvrir les besoins de l'énergie éolienne sont l'aluminium, le chrome, le cuivre, le fer, le manganèse,

le molybdène, le néodyme, le nickel et le zinc. L'étude estime que, en moyenne, les besoins nécessaires pour un scénario à 2 °C sont de 60 % supérieurs à ceux du scénario 4 °C.

Énergie solaire

Il existe actuellement plusieurs technologies pour construire des panneaux solaires, chacune avec des besoins spécifiques en silicium, métaux et terres rares (indium, gallium, sélénium ou germanium). Le rapport en considère seulement quatre, principalement les technologies pure silicium ou celles à partir de « film solaire ». Ceci étant, les technologies évoluent très rapidement et il est aujourd'hui difficile de faire des prédictions sur les technologies qui vont se développer le plus rapidement dans le futur proche. Avec toutes ces précautions, pour l'indium par exemple, l'étude estime qu'il faudrait produire, dans le scénario 2 °C, entre 50 000 et 80 000 tonnes cumulées en 2050 alors que seulement 670 tonnes sont produites annuellement.

Les principaux métaux concernés pour couvrir les besoins de l'énergie solaire sont l'aluminium, le cuivre, l'indium, le fer, le molybdène, le nickel, l'argent, le zinc. L'étude estime que, en moyenne, les besoins nécessaires pour un scénario à 2 °C sont le double de ceux nécessaires au scénario à 4 °C.

Stockage, batteries

Le rapport reconnaît que c'est la technologie sur laquelle il est le plus difficile de faire des projections car il n'existe pas de scénario défini pour le futur et les choix technologiques ne sont pas encore établis. Trois domaines sont évoqués dans l'étude, les besoins dans les transports automobiles (technologie *start - stop*, véhicules hybrides, électriques), la gestion des réseaux (stockage d'électricité produite par des sources intermittentes), ce qui est décentralisé (maison individuelle, petite échelle). Les principaux métaux concernés pour couvrir les besoins en stockage sont l'aluminium,

le cobalt, le fer, le plomb, le lithium, le manganèse et le nickel. Bien que les projections soient incertaines, il est estimé que les besoins nécessaires pour un scénario à 2 °C sont 1 000 pourcent fois supérieurs au scénario 4°C. Le marché du lithium risque d'être tendu.

Distribution géographique des ressources

À partir des bases de données et des travaux du « Conseil international sur la mine et les métaux » et de l'*US Geological Survey*, les offres et besoins de chacun de ces éléments ont été analysés et cartographiés avec :

- une comparaison entre la production minière actuelle et une estimation de la demande projetée à l'horizon 2050 pour les scénarios d'augmentation de température de 2, 4 et 6 °C. Une fourchette d'incertitude assez grande a été prise pour chaque élément, l'aspect quantitatif est donc à regarder avec précaution ;
- une cartographie des principaux pays producteurs et une projection de leurs réserves (économiquement productible) ainsi que la part de ces réserves qui se situent dans les pays en développement;
- une tentative de cartographie des ressources (potentiellement productibles). Cette cartographie est à utiliser avec précaution car il n'y a pas de base de données établie et fiable et elle reste donc très incomplète.

Conclusion concernant le rapport de la Banque mondiale

Le rapport reconnaît qu'il est très difficile aujourd'hui de faire des projections fiables sur la liste des métaux dont on aura le plus besoin à l'horizon 2050 car cela dépendra très fortement des technologies utilisées ainsi que de leur évolution et des innovations techniques qui apparaîtront forcément au fil du temps. En prenant toutes ces précautions d'usage, le

rapport estime néanmoins que les besoins en métaux pour l'éolien et le solaire vont doubler alors que les besoins liés aux activités des batteries pourraient être bien supérieurs et atteindre les 1 000 % par rapport au scénario 4 °C.

Cette augmentation en besoin de métaux ne concerne pas seulement les terres rares, mais aussi des métaux de base tels l'aluminium, le cuivre, l'argent, le nickel, le zinc.

En conclusion, ce rapport cherche à :

- ▷ démontrer le lien qui existe entre la réduction des émissions de gaz carbonique et l'augmentation des besoins en métaux nécessaires à la construction d'équipements qui permettront d'atteindre ces objectifs décarbonés ;
- ▷ faire une cartographie à l'échelle du globe des productions et réserves pour chacun de ces métaux identifiés comme importants et identifier quels métaux vont tirer parti du développement d'énergies renouvelables ;
- ▷ sensibiliser les organismes de recherche, les acteurs sur le climat, les mouvements écologiques, le développement durable, les pays en développement... sur l'importance de la gestion des impacts sur les écosystèmes, l'environnement, les sociétés locales... qui vont nécessairement accompagner cette augmentation de production et encourager le dialogue entre ces différentes entités.

Il existe peu de littérature sur ce sujet aussi ce rapport se veut comme une première étape et recommande de s'intéresser à plusieurs autres axes de réflexion tels que :

- la gestion du développement durable dans l'extraction des minéraux et métaux (impact sur l'environnement, empreinte carbone de l'activité minière...) ;
- une cartographie de détail des ressources métalliques ainsi qu'une identification des sous-produits des métaux (e.g. indium sous-pro-

duit du zinc). Dans le cadre d'une projection à 2050, le rapport souligne l'absence de données fiables sur le niveau des ressources qui demanderait un inventaire plus détaillé (les ressources qui ne sont aujourd'hui pas économiques ou qui ne sont pas explorées) ;

- une étude plus poussée sur la prédiction des technologies futures (disponibilité vs coût) ;
- une étude d'impact des autres secteurs volontairement exclus du rapport (véhicules légers, efficacité énergétique dans les bâtiments, transmission, distribution...) ;
- une évaluation du taux de recyclage et comment l'améliorer.

ANNEXE VI

Les hypothèses de base sur les technologies et les ruptures potentielles

Quatre familles de technologies essentielles sont principalement à mettre en œuvre dans la transition énergétique.

- Des technologies de production :
 - la production d'énergie solaire,
 - la production d'énergie éolienne,
 - la production d'énergie hydraulique,
 - les bioénergies,
 - la production d'énergie nucléaire ;

- Des technologies de stockage d'énergie :
 - mobiles,
 - stationnaires de courte durée,
 - stationnaires de longue durée.

On peut aussi rattacher au stockage des technologies facilitant les opérations de transport et de stockage par transformation rendant interchangeables les énergies, comme les électrolyseurs permettant de transformer l'électricité en hydrogène,

les piles à combustibles, les nouvelles formes de mobilité à gaz ou hydrogène.

- Des technologies de gestion des réseaux d'énergie ;
- Des technologies d'utilisation rationnelle de l'énergie :
 - Dans le logement,
 - Dans l'industrie.

Production d'énergie

Énergie solaire électrique

Dans le monde, le marché des panneaux solaires (PV) représentait une puissance nouvellement installée en 2016 de 77 GW, pour 320 GW totaux installés et une production de 333 TWh. Le silicium polycristallin représentait 93 % du marché mondial des panneaux solaires¹⁹. En France, la puissance supplémentaire installée en énergie solaire au cours de l'année 2016 représentait 576 MW, portant à 6,8 GW la puissance du parc solaire français, et une production de 9,2 TWh²⁰. Le ratio d'utilisation²¹ moyen en France était de 15 % en 2016.

Les technologies disponibles sont principalement le silicium multicristallin et le silicium monocristallin. Ces deux technologies représentent 93 % du marché. Après une progression régulière du multicristallin, le monocristallin gagne à nouveau du terrain, grâce aux progrès de la technologie et des rendements. Pour autant, deux technologies nouvelles « couches minces » existent et se développent : le CdTe (tellure de cadmium : essentiellement par la société américaine First Solar) et le CIGS (cuivre, indium,

19 Source : Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, Freiburg, 12 juillet 2017-*Photovoltaic reports*

20 Source : Réseau de Transport de l'énergie RTE, Panorama des énergies renouvelables en France, 2016.

21 Énergie livrée en MWh divisée par la puissance installée en MW, ce qui donne un nombre d'heures rapporté lui-même aux 8 760 heures d'une année.

gallium, sélénium : plusieurs acteurs japonais et chinois). On assiste dans les laboratoires de recherches à une explosion de nouvelles solutions dictées essentiellement par deux objectifs : la baisse de coût et l'accès à des matières premières plus abondantes. Citons en particulier l'arrivée de l'utilisation des « quantum dots » (boîtes quantiques), des pérovskites et du CZTS, un semi-conducteur à gap direct constitué de cuivre, de zinc, d'étain et de soufre, qui ont fait des progrès spectaculaires, quoique leurs commercialisations soient encore lointaines.

Pratiquement tous les acteurs importants sont asiatiques ou fabriquent en Asie. La baisse des coûts des cellules photovoltaïques a été spectaculaire et a pour conséquence que les coûts d'installation et de raccordement représentent désormais une part importante des coûts totaux, rendant ainsi les rendements en énergie des panneaux de première importance dans le coût du kilowatt installé. La baisse des subventions, les règles d'urbanisme et la perception du voisinage peuvent cependant créer des freins au développement de l'électricité photovoltaïque intégré au bâti ou aux fermes solaires.

L'hypothèse prise en compte dans le calcul des besoins en matériaux est donc que la technologie au silicium devrait être celle des développements solaires pour les cinq à dix années à venir. Les évolutions vers les films minces cadmium-indium-gallium-sélénium (CIGS) ou bien cadmium-tellure (CdTe) n'ont pas connu le succès escompté. Les perfectionnements des cellules dites à multijonction ou à pérovskites sont encore au stade du développement industriel.

De nombreuses autres technologies sont encore à l'état de recherche. Parmi les technologies qui offrent les plus forts rendements sont les cellules dites à multijonction, constituées de plusieurs couches minces de différents semiconducteurs sensibles à des fréquences différentes du spectre lumineux. En l'état actuel, ces technologies ne sont pas économiquement compétitives avec les cellules traditionnelles et ne sont intéressantes que lorsque le rendement électrique est primordial, par

exemple dans le cas de l'aéronautique. Les matériaux nécessaires pour la mise en œuvre de cette technologie seraient l'arséniure de gallium, l'indium, le germanium et le phosphore.

D'autres technologies émergent comme les cellules à pigment photosensible utilisant de l'oxyde de titane, un semi-conducteur et divers pigments, les cellules organiques, les cellules à boîte quantique, (quantum dot). Une technologie prometteuse est celle des cellules à Pérovskite, qui ont l'avantage d'être peu coûteuses à la fabrication mais avec les inconvénients d'une stabilité insuffisante et d'utilisation de plomb et d'étain.

Besoins en matériaux

Les quatre matériaux ci-dessous sont les constituants les plus importants en termes de coût des installations solaires. Aucun d'entre eux n'entre dans la composition des cellules photovoltaïques proprement dites :

Béton	Acier	Verre à haute transmissivité	Composites
de 100 à 1 000	100	73	19

(en tonnes par MW solaire installé)

Énergie solaire à concentration

Toutes ces technologies visent à faire de l'électricité. Or, c'est souvent de la chaleur que l'industrie et le bâtiment ont besoin. Le solaire thermique, après des années d'un démarrage assez lent, prend maintenant de l'ampleur pour les besoins de vapeur entre 100 et 500 °C. La technique est relativement simple, des miroirs renvoient les rayons du soleil sur un tube qu'il chauffe, selon la température voulue ; il s'agit d'eau ou de sels fondus. La chaleur peut être stockée et donc ces technologies ont l'avantage de pouvoir être opérées jour et nuit.

Énergie solaire thermodynamique

Dans certaines circonstances, et notamment lorsque l'on dispose d'une source froide convenable, l'énergie thermique solaire obtenue par la concentration des rayons lumineux peut être convertie en électricité. La centrale solaire Noor, près de Ouarzazate au Maroc, a une puissance installée de 160 MW (miroirs cylindroparaboliques) pour Noor 1, 200 MW (miroirs cylindroparaboliques) pour Noor II (avec un stockage par sels fondus de 8 heures) et 150 MW pour Noor III (thermo-solaire avec tour). La source froide est fournie par le barrage de Mansour Eddhabi. Noor IV sera photovoltaïque et portera la puissance à 580 MW.

Énergie éolienne

Il existe de nombreuses catégories d'éoliennes, marines ou terrestres, à axe vertical ou horizontal, à transmission directe ou à transmission à travers une « boîte de vitesses », à générateur électrique synchrone ou asynchrone. Les générateurs synchrones peuvent être à rotor enroulé alimenté ou à aimant permanent, et les générateurs asynchrones ou alternateurs peuvent être à cage d'écureuil ou à rotor enroulé. Pratiquement toutes les combinaisons existent.

Les matériaux traditionnels (béton, acier, cuivre, fibre de verre...) sont nécessaires et la quantité utilisée rapportée à la puissance installée et à l'énergie fournie au réseau nettement est supérieure à celle des centrales électriques classiques. Parmi les technologies de générateurs, ceux utilisant des aimants permanents requièrent des quantités importantes de certaines terres rares (le dysprosium et le néodyme), de samarium, de cobalt et de l'alliage aluminium-cobalt-nickel. Or, le recours à ces technologies est en forte croissance pour les éoliennes offshore et onshore. Il en sera de même pour les éoliennes flottantes.

Compte tenu du caractère sensible de l'accès à la ressource en terres rares et des autres matériaux utilisés pour fabriquer des aimants perma-

nents, le choix de la technologie, soit à aimants permanents soit à rotor enroulé, a un impact direct sur la stratégie d'accès à certains matériaux (dont les terres rares) et sur la sensibilité aux variations de prix de ces mêmes matériaux. Le choix de la technologie doit intégrer cet aspect spécifique de l'accès à la ressource.

La technologie à aimants permanents est de plus en plus fréquente pour les machines synchrones à attaque directe, qui permettent d'éliminer le multiplicateur dont l'entretien est coûteux (surtout en mer) et de développer des machines synchrones plus aptes à avoir un rôle positif pour le réseau électrique.

La puissance éolienne installée dans le monde était de 487 GW à la fin de 2016, dont 14 GW en mer. En France la puissance éolienne installée à la fin de 2016 était de 11,670 GW. La puissance installée est en rapport avec la production d'électricité en fonction du taux d'utilisation du parc éolien, variable selon les années et les régions (20 % en 2016 en France avec 20,7 TWh produits). Il est plus élevé pour les éoliennes en mer, et en particulier pour les nouvelles générations d'éoliennes qui ont des plages d'utilisation plus larges. Des valeurs supérieures à 50 % sont évoquées pour nos régimes de vents. Le développement d'éoliennes en mer en France sera d'environ 15 GW à l'horizon 2030.

Les évolutions technologiques sont l'augmentation de la puissance des éoliennes avec des pales plus longues et, en conséquence, des diamètres de rotor croissants et surtout l'éolien flottant qui va permettre de s'éloigner des côtes et donc de n'avoir pas d'impact visuel pour les habitants. Cette technique en développement permet des économies importantes sur les masses de matériaux de structure nécessaires et est beaucoup moins coûteuse en matériaux que l'installation sur pylônes posés en profondeur. Elle sera sans doute bientôt équivalente à l'éolien terrestre.

Du point de vue de la fabrication, les pylônes sont en acier ou en béton. Un fabricant allemand a proposé des pylônes en bois lamellé-collé, qui pourraient supporter des éoliennes allant jusqu'à 90 mètres. Les pales

des hélices sont en matériaux composites, la fibre de carbone étant le matériau le plus léger, mais aussi le plus onéreux.

D'importants projets de recherche existent par ailleurs dans le monde concernant les éoliennes marines. Les marges principales de progrès résident dans la maîtrise des coûts de maintenance. L'éolien flottant, qui se développe, permettrait des taux d'utilisation encore meilleurs.

BESOINS EN MATÉRIAUX

Pour les éoliennes terrestres, les quatre premiers constituants en termes de masse (et indirectement de coût) sont donnés dans le tableau ci-dessous, auxquels il faut ajouter les terres rares si l'usage des technologies à aimants permanents se généralise.

Acier	Béton (total : tour + socle)	Composite	Cuivre
118	100	11	2,9

(en tonnes par MW installé)

Pour les éoliennes marines à aimant permanent, les terres rares, quoique n'étant qu'en cinquième position (en tonnes par MW), deviennent significatives en coût.

Acier	Composite	Béton (total : tour + socle)	Cuivre	Terres rares
187	16	3 500	1,7	0,066

(en tonnes par MW installé)

Énergie hydroélectrique

L'énergie hydroélectrique est l'énergie renouvelable la plus répandue dans le monde. Elle représente en France 27,5 GW de puissance installée (à comparer aux 63 GW de puissance installée en nucléaire). C'est la

meilleure alliée des productions d'électricité intermittentes puisqu'elle est disponible à tout moment pour pallier les baisses de production des sources intermittentes. Elle joue un rôle essentiel pour assurer la stabilité du réseau et son redémarrage en cas de black-out. Le seul développement prévu en France est l'augmentation des capacités des stations de transfert d'énergie par pompage (STEP) qui passeraient de 4,9 GW actuellement à 7 ou 8 GW en 2030.

Ce développement n'aura pas d'impact sensible sur les besoins en matériaux. Les nouvelles installations exploitent les matériaux naturels disponibles sur place (agrégats et sable pour le béton).

Bioénergies

Les chiffres synthétisant l'utilisation mondiale de la biomasse couvrent les chaudières à biomasse, le chauffage — voire la cuisine au bois — et les nouvelles technologies de biogaz et de bio-fioul. Les évolutions technologiques concernant l'utilisation thermique de la biomasse sont surtout relatives à l'amélioration en constante évolution des systèmes de prétraitement de la biomasse et de traitement des fumées ainsi que l'amélioration des rendements des chaudières. La pyrogazéification offre des perspectives prometteuses : des installations rentables existent déjà.

Les évolutions concernant les biocarburants sont surtout relatives à l'amélioration des rendements à l'hectare et des rendements de fermentation. Trois générations de méthodes de fabrication du biogaz existent. La première génération consiste à utiliser la biomasse humide dans des digesteurs dans lesquels on place des bactéries qui rejettent du méthane. Le biogaz peut être soit produit directement en décharge, ou bien dans des réacteurs. Cette technologie est mature et utilise peu de matières minérales à l'exception de celles qui sont utilisées pour bâtir les réacteurs ou bien pour l'étanchéité des décharges. La deuxième génération est une pyrolyse de la matière organique sèche, il existe un prototype en France au sud de Lyon. Elle est la plus prometteuse en termes de quantité et de

prix de revient. La troisième utilisera les algues pour passer directement de l'énergie solaire aux gaz (méthane et hydrogène), mais elle n'est pas techniquement aboutie.

Le tableau de la figure 2 indique que le biocarburant est consommateur de cobalt et de ruthénium avec des croissances considérables. D'une manière générale, les biocarburants de différentes générations sont de grands consommateurs de catalyseurs qui utilisent le cobalt, le ruthénium, l'indium, l'iridium.

Énergie nucléaire

L'énergie nucléaire a l'avantage d'être une énergie très largement décarbonée. Les émissions de CO₂ sont celles liées à la construction d'une centrale et au cycle du combustible. EDF évalue à 4 g/kWh cette empreinte, ce chiffre étant parfois contesté. La France a consenti dans le dernier quart du siècle passé un investissement sans équivalent dans le monde dans l'énergie nucléaire. L'énergie nucléaire a donc l'avantage pour notre pays de son existence et de sa disponibilité. La question peut se poser de l'approvisionnement en combustibles nucléaires. D'une part les opérations du cycle du combustible nucléaire, à l'exception de l'extraction minière et du premier raffinage (enrichissement, préparation des combustibles, gestion des combustibles irradiés et des déchets associés), sont effectuées sur notre territoire, d'autre part les approvisionnements en oxyde d'uranium naturel sont largement diversifiés et proviennent actuellement du Niger, du Canada, d'Australie et du Kazakhstan. Il n'y a pas actuellement de pénurie prévue en uranium. Une bonne part des opérations minières associées sont d'ailleurs contrôlées par le groupe français Areva.

Les systèmes de stockage d'énergie

On distingue les stockages stationnaires des stockages d'énergie mobiles. L'énergie mobile est un enjeu considérable pour l'autonomie et donc la

mise en œuvre de la voiture électrique hors flotte captive. Les stockages stationnaires à petite échelle sont cruciaux pour l'autonomie de la maison individuelle et à grande échelle pour l'intégration du renouvelable sur le réseau.

Stockage d'électricité mobile

Le marché des batteries rechargeables représentait en 2015 environ 430 GWh, dont 83 % sous forme de batteries « plomb-acide », 15 % de batteries Li-Ion, 1 % de nickel métal hydrure et de cadmium nickel et 1 % d'autres batteries²². La densité d'énergie au poids de batterie fait de la Li-Ion la technologie principale en ce qui concerne l'énergie mobile (électronique grand public, outillage et automobile, ce dernier domaine étant celui qui induira la forte croissance du marché dans les années à venir). Les constructeurs automobiles travaillent aujourd'hui principalement sur la famille des batteries au lithium et il est probable que ce système de batterie sera dominant sur le marché de la voiture électrique dans les quinze prochaines années. Le marché des batteries au lithium est prévu en forte croissance dans les années à venir avec un doublement d'ici 2022 si les conditions d'approvisionnement en lithium le permettent.

La production de lithium est fréquemment associée à des émissions de CO₂ substantielles.

Les recherches en cours sur les batteries sont :

- sur les batteries au lithium :
 - des recherches sur des électrodes nouvelles, notamment les anodes au silicium ou d'autres alliages, les électrodes polymères ou bien l'utilisation du graphène,
 - les batteries dites à état solide : lithium métal, déjà opérationnel dans le système Autolib, mais qui comporte aujourd'hui l'inconvénient

22 Source : Boston Consulting Group (étude privée).

que la batterie doit être chauffée en permanence, et les batteries à électrolyte solide ;

- sur les autres systèmes électrochimiques :
 - les batteries au sodium ou au magnésium, au sulfure de lithium,
 - les batteries dites air-métal, (lithium-air par exemple), en fait des batteries qui exploitent la réaction du métal avec l'oxygène²³, les batteries dites à « radical organique » qui exploitent les échanges électroniques entre radicaux organiques,
 - les batteries dites aux sels fondus (comme au chlorure de sodium nickel) dont les électrolytes sont des sels fondus.

Les dépenses de recherche sur la technologie lithium actuelle sont colossales et la très grande majorité des brevets porte sur cette technologie et ses améliorations possibles. L'examen des différents stades de développement laisse prévoir que les technologies nouvelles ne remplaceront pas la batterie Li-Ion dans l'automobile avant 2030-2035. Les éléments ci-dessus laissent prévoir une demande importante en lithium ainsi qu'en matériaux pour les électrodes, graphite dans l'état actuel de la technologie, ou autres matériaux.

MATÉRIAUX UTILISÉS

Pour une moyenne raisonnable des technologies Li-Ion envisagées à moyen terme, les quantités nécessaires des cinq premiers matériaux sont données ci-après :

////////////////////////////////////

23 Une batterie classique exploite une réaction d'oxydo-réduction réversible dont tous les éléments (combustible et comburant) doivent être en permanence présents dans la batterie. Dans une batterie air-métal, seul le combustible fait partie intégrante de la batterie, le comburant est pris (et restitué) à l'air ambiant, d'où un gain de poids et de volume considérable. Ainsi la combustion du lithium dans l'oxygène donne Li_2O_2 c'est-à-dire qu'il faut 32 grammes de comburant pour 12 grammes de combustible. Le gain massique potentiel des batteries air-métal est donc proche de quatre !

Ni	Li	Co	Ti	Graphite
87	23	56	49	60

(En tonnes par millier de véhicules)

Autres stockages mobiles d'énergie

Au premier chef, et déjà en large utilisation, le biocarburant constitue un stockage de l'énergie solaire.

Stockages stationnaires

STOCKAGES À COURT TERME D'ÉLECTRICITÉ

Ces stockages sont des compléments indispensables à des productions d'énergie intermittentes comme le solaire et l'éolien. Dans l'état actuel des technologies, ils ne peuvent pas compenser des variations saisonnières ou, même, des périodes de plus ou moins fort vent (des périodes très peu ventées de 5 à 7 jours sur l'ensemble du territoire métropolitain sont constatées chaque année), ils peuvent seulement permettre la régulation du réseau ou l'alternance jour-nuit. Les batteries de forte puissance sont pour l'instant essentiellement réservées à la régulation du réseau sur de faibles durées, souvent dans des systèmes insulaires ou isolés.

Les stockages stationnaires n'ont en principe pas besoin d'une performance énergie/poids, à la différence des systèmes d'énergie mobile. En revanche, ils ont besoin de capacité de stockage et de puissance qui en sont les caractéristiques déterminantes. Les batteries classiques au plomb peuvent être utilisées. Les stockages stationnaires bénéficieront aussi des progrès réalisés sur la technologie Li-Ion. Actuellement le stockage triple le prix des énergies intermittentes et donc n'est pas compétitif.

AUTRES STOCKAGES À COURT TERME

Les stockages d'hydrocarbures, mais aussi les stockages d'air comprimé en réservoirs métalliques, sont aussi des moyens de stockages.

Stockages à long terme

STOCKAGE À LONG TERME D'ÉLECTRICITÉ

Il n'existe pas aujourd'hui de solution économique viable de stockage direct de l'électricité à long terme. Les stations de transfert d'eau par pompage (STEP) existantes fournissent de la puissance pendant quelques heures à l'exception de deux STEP (Grand-Maison et Montézic) qui peuvent fonctionner une vingtaine d'heures à pleine puissance²⁴. La puissance installée en STEP est égale actuellement à 4,9 MW et devrait passer à 7 ou 8 MW en 2030. Ces installations permettent de fournir de l'assistance au réseau, ce qui sera d'autant plus nécessaire que le taux d'énergies intermittentes augmente (principalement l'électricité photovoltaïque générée en courant continu).

Les stockages à envisager passent par la conversion de l'électricité en une autre énergie, air comprimé, hydrogène via les électrolyseurs, et potentielle méthanisation de l'hydrogène, voir production de biocarburants pour stocker directement de l'énergie solaire.

Le système électrique français actuel stocke l'énergie électrique sous forme hydraulique en gérant le remplissage naturel et l'exploitation au cours de l'année des lacs de barrages. Cette puissance rapidement disponible est de 18 GW. Cette puissance pourrait être augmentée en suréquipant les centrales existantes pour répondre aux demandes de pointe, mais cela ne changera pas la quantité d'énergie disponible chaque année, qui dépend du régime de pluies et de neige.

24 La puissance installée en STEP est proche de 5 GW : Montezic, Grand-Maison, Revin, Super Bissorte, la Coche, Le Cheylas, le Lac Noir. La majorité des STEP françaises fonctionne environ 5 heures à pleine puissance. Elles fournissent un soutien précieux au réseau et opèrent de nombreuses interventions brèves et nécessaires. Seules deux STEP permettent des durées de fonctionnement plus longues : la STEP de Montezic qui peut fonctionner 33 heures à pleine puissance en exploitant la totalité du volume stocké, et la STEP de Grand-Maison et Le Verney qui n'est pas une STEP pure, puisque chacun des barrages reçoit l'eau du bassin versant, et qui peut fonctionner une vingtaine d'heure en STEP.

Le combustible nucléaire (uranium et Mox) est une autre forme de stockage de l'électricité flexible, puisque les centrales nucléaires françaises peuvent techniquement assurer le suivi de charge du réseau électrique.

STOCKAGE À LONG TERME D'AUTRES ÉNERGIES

Comme les stockages d'électricité à long terme n'existent pas dans la réalité, une des solutions est de stocker d'autres énergies facilement transformables, ce qui introduit la question de l'interchangeabilité.

Stockage de gaz à long terme

Les technologies de stockage à long terme de gaz naturel en aquifères ou bien en cavités salines ou encore (plus rarement) en site épuisé d'hydrocarbures, sont bien connues et utilisées depuis une cinquantaine d'années. Elles sont sûres, d'un rendement convenable (30 % environ de la capacité du stockage est bloquée sous forme de gaz « coussin » qu'on ne peut pas récupérer, mais cette quantité est à considérer sur la durée de vie du stockage, qui se chiffre en plusieurs dizaines d'années). Les stockages en aquifères ont une forte contenance et un débit de soutirage moyen tandis que les stockages en cavités salines ont en général des contenances modérées mais un fort débit de soutirage. La seule difficulté réside dans la mise en évidence et l'autorisation de nouveaux sites de stockage.

Autres stockages

La technologie du **stockage en cavités salines** se heurte aujourd'hui à des difficultés (de type effets mécaniques de l'alternance du remplissage sur le sel) lors d'une utilisation en cycles courts. Les stockages en cavité saline sont donc mieux adaptés à une utilisation à long terme qu'à court terme.

Le **stockage d'énergie** en cavité souterraine sous forme d'air comprimé est aussi une solution. L'air est comprimé lorsque l'électricité est disponible et est utilisé comme comburant dans une turbine à gaz (à haut rendement puisque l'énergie de compression a déjà été dépensée) pour restitution d'électricité aux heures de pointe. Les rendements globaux

sont assez médiocres et des systèmes avancés de stockage adiabatiques sont en cours d'étude.

Conclusion pour les stockages

Le développement croissant des technologies de stockage ne modifie pas structurellement l'usage des matières premières. L'augmentation des stockages de gaz en souterrain a un impact sur l'usage du sous-sol national.

L'interchangeabilité gaz et électricité

Des travaux significatifs sont réalisés actuellement sur les techniques d'électrolyse pour la production d'hydrogène. Ils offrent de larges possibilités de stockage de l'énergie, soit sous forme de gaz ou liquide, soit après recombinaison avec le dioxyde de carbone, sous forme de méthane ou d'alcool. L'hydrogène peut être injecté jusqu'à 10 % dans le réseau de gaz, ou bien retransformé en électricité grâce à une pile à combustible. Le méthane est directement injecté dans le réseau de gaz ou peut être retransformé en électricité par une pile à combustible ou plus classiquement par des turbines à gaz. Ces technologies peuvent conduire à une interchangeabilité accrue de deux formes d'énergie avec, comme conséquence, un rapprochement des réseaux de gaz et d'électricité. Cette technologie permettrait de maintenir l'alternative intéressante d'une utilisation accrue du gaz naturel pour les véhicules, qui est 30 % moins polluante que les véhicules à essence ou diesel en termes de CO₂ et sans émission de particules.

La production d'hydrogène et sa conversion en électricité

Les techniques de l'électrolyse pour la production d'hydrogène à partir de l'électricité et des piles à combustible pour la production d'électricité à partir de l'hydrogène, du méthane ou des alcools, sont comparables avec quatre techniques pour la première et cinq pour la seconde.

ÉLECTROLYSE

Elle peut être à haute ou à basse température. Dans le cas de la basse température, des catalyseurs coûteux sont nécessaires. La haute température est privilégiée au moins au stade du développement pour éviter l'utilisation de métaux précieux. À basse température, les électrolyseurs peuvent être à électrolyte acide (solution qui n'est plus utilisée industriellement), à électrolyte alcalin, (un sel est ajouté pour améliorer la conductivité de l'eau et faciliter l'électrolyse), à membrane polymère ou céramique. Dans ces deux derniers cas, la technologie utilisée est dérivée de celle des piles à combustibles et l'installation est dans certains cas utilisable en pile à combustible, le stockage d'hydrogène stockant effectivement l'électricité. À l'exception des membranes céramiques, les températures sont de l'ordre de 60 à 90 °C. Les membranes céramiques peuvent quant à elles fonctionner à plus haute température.

PILES À COMBUSTIBLE

On retrouve les mêmes technologies que celles mentionnées ci-dessus.

- les piles à solution acide ou PAFC fonctionnent à 150-200 °C et utilisent l'hydrogène ;
- les piles alcalines (Alcaline Fuel Cells ou AFC) fonctionnent entre 50 et 200° et utilisent l'hydrogène ;
- les piles dites MCFC, ou à carbonates fondus ou sels fondus fonctionnent de 600-700 °C et utilisent ou bien l'hydrogène ou bien le méthane ;
- les piles à membrane polymère (PEMFC) fonctionnent entre 80 et 100 °C et utilisent l'hydrogène. Il existe des variantes à éthanol et à méthanol (Direct Méthanol/Ethanol Fuel Cell, DMFC/DEFC) ;
- les piles à oxyde solide SOFC fonctionnent à haute température (600 à 1 000 °C) et utilisent l'hydrogène ou bien le méthane.

Les techniques utilisant les membranes et les céramiques sont les plus prometteuses et concentrent les activités de recherche. Les technologies à membranes utilisent des catalyseurs à base de métaux précieux, ce qui augmente notablement les coûts. Les technologies à haute température à base de céramique ne sont pas encore développées au niveau industriel.

MATÉRIAUX UTILISÉS

La matière minérale la plus critique, dans les électrolyseurs à membrane, est celle du catalyseur (platine, iridium, ruthénium) et de l'or dans certains cas. Pour l'électrolyse de forte puissance (1 kW à 10 MW) avec une grande garantie de service (5-10 ans de durée de vie), le poids des métaux précieux dépasse les 100 kg/MW, ce qui donne un coût moyen supérieur à 2 M€/MW. L'utilisation de catalyseurs de platine est un point faible de ces technologies tant sur les prix des équipements, qui peuvent atteindre 6 M€/MW, que sur les risques de rupture d'approvisionnement en ces métaux essentiellement produits par un seul gisement au monde en Australie. Le prix moyen de l'hydrogène produit est de 4 €/kg soit 143 €/MWh. À comparer à l'hydrogène produit par reformage de méthane qui est autour de 2 €/kg ou à confronter au biométhane qui varie de 45 à 125 €/MWh. Un fort investissement dans ces technologies demanderait en parallèle de développer les capacités de recyclage des platinoïdes pour en maîtriser la filière. Le développement actuel de nouvelles technologies à haute température offrira à moyen terme des capacités alternatives pour la production d'hydrogène à partir de l'électricité.

L'UTILISATION DE L'HYDROGÈNE DANS LE TRANSPORT

Pour les véhicules légers et lourds, l'hydrogène peut être un carburant utilisé via une pile à combustible et un moteur électrique ou directement dans un moteur thermique. L'avantage est une densité énergétique

(kWh/kg) trois fois supérieure à celle du pétrole, permettant une grande autonomie (600-800 km) avec un plein rapide comparable aux temps de remplissage d'un réservoir d'essence ou de gaz actuel. Les rendements des piles à combustible sont très élevés, de l'ordre de 80 à 95 % avec 40-60 % pour la production d'électricité et le reste en chaleur. Reste à fiabiliser le stockage mobile et stationnaire de l'hydrogène afin de garantir la sécurité des usagers. La première application pourrait concerner les camions et les navires.

LA TRANSFORMATION SOUS FORME D'ALCOOL

L'hydrogène peut aussi être recombiné avec le CO₂ capturé par ailleurs pour produire de l'alcool. Certaines piles à combustible (les DEFC *Direct Ethanol Fuel Cells*, dérivées des piles à membrane électrolyte polymère PEMFC, les piles à combustibles à membranes à échange de proton, ou les piles à combustible à membranes polymères ou bien les DMFC *Direct Methanol Fuel Cells*) peuvent aussi utiliser l'alcool. La facilité de stockage de l'éthanol par rapport à l'hydrogène peut donner un intérêt à ces technologies. Toutefois les piles à combustible utilisant cette technologie sont aujourd'hui de relativement faible puissance. Ces technologies n'introduisent pas de changements structurels dans la demande en matériaux.

LE STOCKAGE DE L'HYDROGÈNE

Le stockage peut être sous forme liquide, mais l'hydrogène est extrêmement difficile à liquéfier, il est gazeux à haute pression. Des technologies de « cartouches d'hydrogènes » avec changement de cartouche à l'étape ont été développées pour la mobilité. D'autres technologies sont actuellement développées, comme les hydrures de magnésium²⁵ qui ont la capacité de se combiner de manière réversible avec l'hydrogène et de fournir un stockage solide. D'autres méthodes font l'objet de recherches

////////////////////////////////////

25 Mais au prix d'un rapport énergie stockée/masse défavorable.

(transformation en acide formique, adsorption sur des supports tels que les polysilanes, etc.). Ces technologies n'introduisent pas de changements structurels dans la demande en matériaux.

Les techniques de gestion du réseau électrique

La mise en œuvre de la transition énergétique va demander d'importants investissements de contrôle et de régulation du réseau électrique. Ceci concerne principalement l'électronique de puissance, mais aussi les nouvelles technologies augmentant l'interchangeabilité des énergies, par exemple en transformant l'électricité lorsqu'elle est surabondante en chaleur, plus facile et moins chère à stocker que l'électricité, ou en hydrogène.

Les techniques d'utilisation rationnelle de l'énergie

Dans les pays développés (Europe, USA...) les bâtiments consomment environ 40 % de l'énergie utilisée. Il y a donc des enjeux importants sur les matériaux de construction. Par exemple, le sable (la silice), qui est pourtant l'un des matériaux les plus abondants sur terre, est de moins en moins accessible. Pour des raisons environnementales, il est difficile de le puiser en milieu naturel (mers, océans, fleuves...). De plus, certaines qualités de sable très pur utilisées dans la fabrication du verre ou des mortiers sont difficiles à trouver.

D'autres enjeux ont trait à la fabrication de matériaux nouveaux. Par exemple, fabriquer des matériaux ayant de très petits pores (quelques dizaines de nm) permet de faire des isolants thermiques à haute performance (isolant mince, enjeu important dans la rénovation). Si on sait fabriquer de tels matériaux (aérogels), leur coût de fabrication est encore trop élevé pour des applications massives.

La question des réglementations de l'accès au sous-sol sur lesquelles la France est en avance, peut s'étendre à d'autres régions productrices de métaux et changer la donne économique. Certains pays ont aussi interdit l'accès à leur sous-sol (Colombie) et dans d'autres les populations sont sous pression (Pérou). Les réglementations, sans nécessairement interdire, peuvent renchérir l'exploitation. Les contraintes peuvent aussi être politiques, voir la Chine et les terres rares.

ANNEXE VII

Les ressources minérales marines accessibles à la France

L'intérêt pour l'exploration et la connaissance des espaces océaniques ne peut se justifier maintenant sans considérer les ressources minérales. Depuis une quarantaine d'années, les découvertes progressives de diverses formes de minerais d'intérêt ont transformé ces domaines encore largement inconnus en un nouvel eldorado pour les métaux. C'est ainsi qu'ont été identifiés dès les années 1970 les nodules polymétalliques (fer, manganèse, nickel, cuivre...), les encroûtements de manganèse (cobalt, platine...) puis les sulfures hydrothermaux (cuivre, zinc, or, argent...) et plus récemment encore l'hydrogène naturel. Ces minéralisations contiennent aussi des métaux dits critiques pour les nouvelles technologies tels que terres rares, indium, germanium, gallium, sélénium...

Ces découvertes ouvrent de nouvelles frontières pour la recherche et l'identification de ressources minérales et énergétiques dans les océans. Les ressources minérales marines profondes nous offrent l'opportunité de combiner recherche scientifique, progrès technologique, valorisation économique, sécurité pour certains métaux et participation à la mise en place collective d'une gestion durable de ce nouvel espace.

La France dispose d'un ensemble cohérent d'expertise scientifique et de compétences technologiques en matière de grands fonds sous-marins ou d'exploitation minière : l'Ifremer, le BRGM, le CNRS et les universités, pour les établissements publics, Technip, Areva, Eramet, pour le secteur privé. La France dispose ainsi du potentiel pour mener à bien les recherches

scientifiques et développer les technologies, potentiellement révolutionnaires, pour l'accès à ces ressources minières. La France peut accéder à des gisements localisés dans deux contextes :

La ZEE

Cette zone économique exclusive est la 2^e du monde avec 11 millions de km²). Avec laquelle, la France dispose d'espaces profonds dans les trois océans. L'Outre-mer représente 9,7 millions de km² et la majeure partie de ce territoire (96 %) se situe à des profondeurs de plus de 500 m.

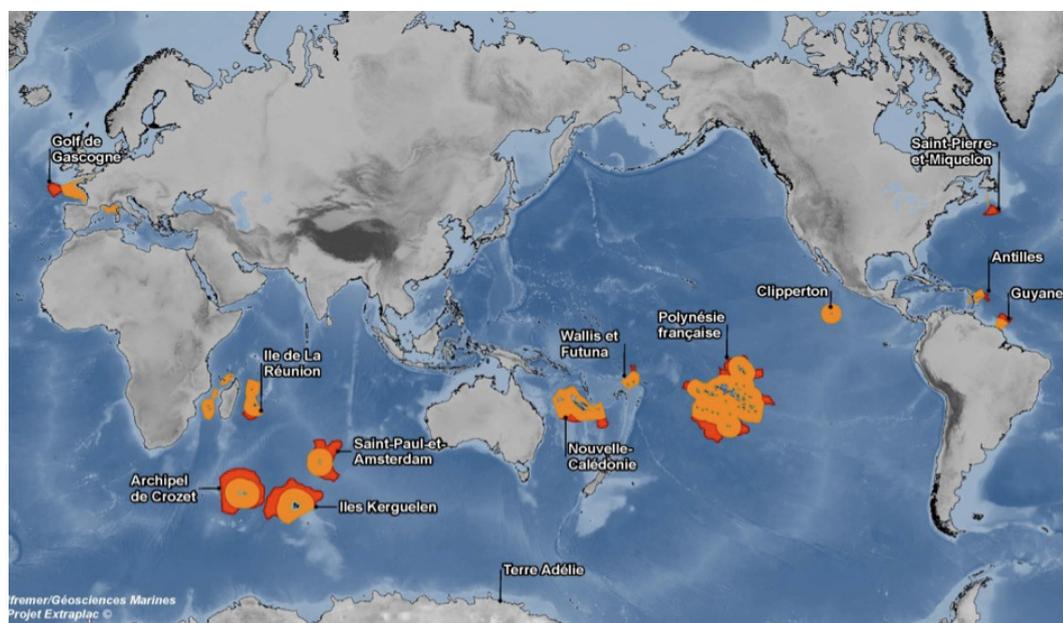


Figure A-VI-1 La zone économique française (en orange) et les extensions du plateau continental (en rouge).

Les limites reportées sur la carte sont indicatives (Ifremer, 2013) - les eaux internationales où la France peut intervenir à travers l'organisation internationale ISA (International Seabed Authority) (AIFM, Autorité internationale des fonds marins), dépendante de l'ONU, qui délivre des permis d'exploration et d'exploitation.

Devant l'évolution rapide de la demande en matières premières minérales et l'intérêt croissant de l'industrie, l'ISA a voté en 2010, 2012 et 2013 des textes légiférant l'exploration des ressources minérales dans les eaux internationales. La Chine, l'Inde, la Russie et la Corée du Sud ont récemment débuté d'ambitieux programmes d'exploration centrés sur l'accès aux ressources des grands fonds. À partir de 2010, la Chine, la Corée et l'Inde ont ainsi déposé des demandes de permis exclusifs dans l'océan Indien, tandis que la Russie et la France le faisaient sur la dorsale *médio-atlantique pour rechercher des minéralisations hydrothermales*. La France a aussi mené en 2010 une première exploration de la ZEE française autour des îles Wallis et Futuna associant les organismes publics et les sociétés Technip, Eramet et Areva. Elle a ainsi découvert un vaste domaine de volcanisme récent (nouvelle dorsale, nouveaux volcans) et elle a pu localiser plusieurs dépôts hydrothermaux.

Des entreprises privées s'intéressent aussi aux ressources minérales sous-marines. Des permis d'exploration ont ainsi été déposés sur de nombreux champs hydrothermaux dans l'ouest du Pacifique par la société canadienne Nautilus Minerals (230 000 km²) et la société américaine Neptune Minerals (264 000 km²). Nautilus prépare l'exploitation de dépôts hydrothermaux en Papouasie ce qui constituera la première exploitation de ressources minérales par 1 800 m de profondeur (prévu en 2019). La société française d'ingénierie pétrolière Technip est au premier rang auprès de Nautilus et de Neptune pour réaliser les équipements nécessaires à l'exploitation des minerais sulfurés par grande profondeur.

Les minerais

Quatre grands types de minerais sont répertoriés : les sulfures hydrothermaux, les encroûtements, les nodules et l'hydrogène natif, qui sont présents dans tous les océans.

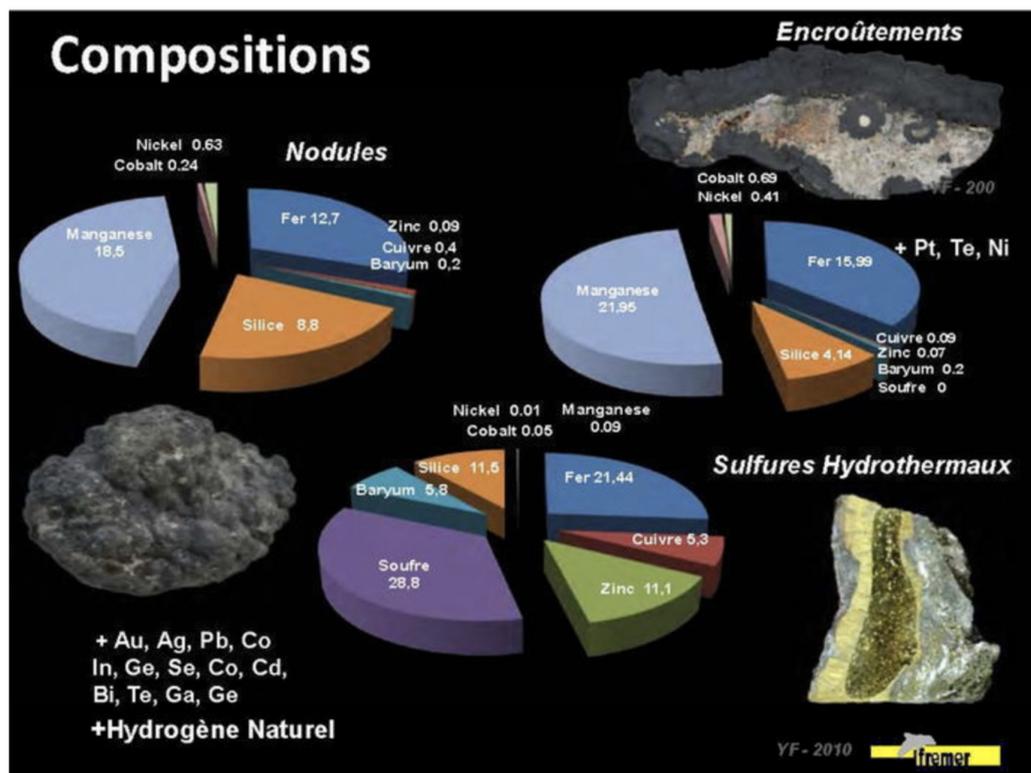


Figure A-VI-2 : Concentrations (% en poids) en éléments majeurs dans les minéralisations des grands fonds océaniques (Ifremer)

(i) **Les sulfures hydrothermaux**, dont l'exploration et l'exploitation potentielle seront au centre de tous les enjeux :

- **géopolitiques** (pour les eaux internationales) dans le cadre de la mise en place des permis ISA ;
- **environnementaux** (avec des conflits probables sur les conditions de protection et d'exploitation des sites) ;
- **scientifiques** (métallogénie, processus volcaniques et tectoniques, géochimie des roches et des fluides, ressources biologiques...) ;

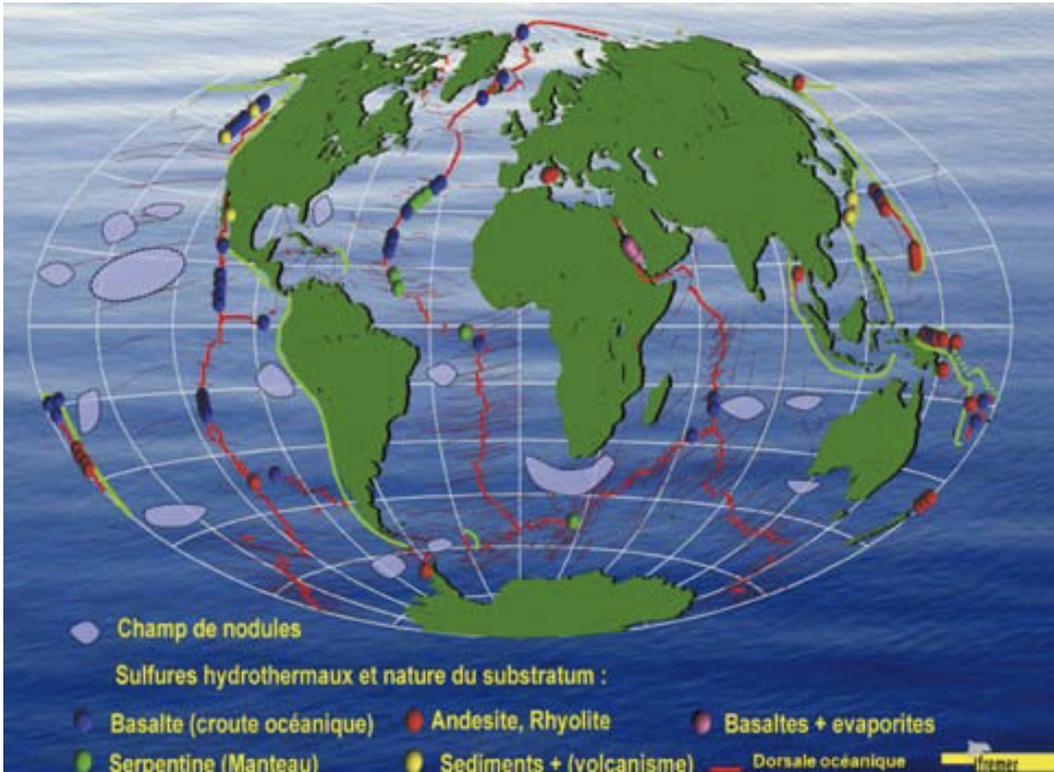


Figure A-VI-3 : Localisation des sites hydrothermaux (en fonction la nature de leur substratum) et des champs de nodules à l'échelle mondiale (Ifremer)

- **économiques** : ce type de minerai est bien connu dans les gisements fossiles exploités à terre et formés dans les paléo-océans. Ils nous fournissent une partie importante du cuivre, du zinc, de l'argent et l'or exploités sur les continents. Les dépôts sous-marins varient de quelques dizaines de milliers de tonnes de sulfures polymétalliques jusqu'à des dizaines de millions voire plusieurs centaines de millions de tonnes. Ces minéralisations sont souvent associées à des productions abondantes d'hydrogène natif sur les sites hydrothermaux actifs.

Les sulfures hydrothermaux se caractérisent par de forts enrichissements en métaux de base par rapport aux encroûtements et aux nodules. Ainsi,

le total cuivre + zinc dépasse fréquemment les 15 %. De plus, la plupart des sites sont enrichis en argent et souvent en or. Certains sites spécifiques de l'Atlantique associés à des roches du manteau présentent des teneurs intéressantes en cobalt. Plusieurs éléments rares accompagnent les métaux principaux. Par exemple au cuivre peuvent être associés des enrichissements en sélénium, cobalt, nickel, molybdène, tellure, bismuth et or. Le zinc s'accompagne d'enrichissements en cadmium, plomb, arsenic, antimoine, germanium, indium, baryum.

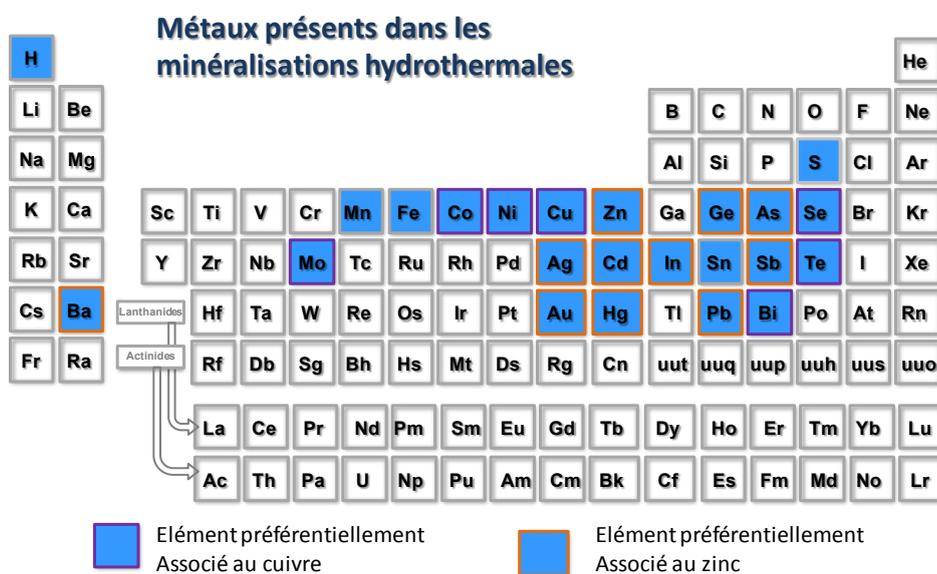


Figure A-VII-4 : Métaux enrichis dans les minéralisations sulfurées hydrothermales <http://docplayer.fr/4436106-Synthese-d-une-etude-prospective-a-l-horizon-2030.html> (Ifremer)

Les affinités des éléments mineurs avec le cuivre ou le zinc sont précisées.

Si les conditions de formation des sites sont assez connues, l'inventaire reste très incomplet (plusieurs centaines de sites pressentis). Les technologies d'exploration permettent uniquement de localiser les sites actifs (en cours de formation), à la différence des sites inactifs qui restent

à rechercher de manière plus systématique et ne peuvent, dans l'état actuel des technologies, être localisés que par des opérations près du fond.

Les technologies d'exploitation sont connues par segment. Les procédés d'extraction sont en cours de développement / validation. Stockage, logistique et traitements du minerai sont en cours d'étude. Le projet Nautilus en cours (ZEE de Papouasie) sera riche d'enseignements. Le leadership technologique mondial dans ce domaine est français : Technip (projet pilote). Le coût d'extraction paraît globalement comparable aux coûts d'extraction de mines souterraines (90 \$/T) avec un temps de développement prévisible de 2 à 5 ans.

(ii) Les encroûtements, dont l'exploitation n'interviendrait pas avant 2030 (exploitabilité incertaine, disponibilités technologiques...) malgré un fort potentiel.

Des encroûtements d'oxydes ferro-manganésifères ont été répertoriés dans tous les océans à des profondeurs allant de 400 à 4 000 m. Les estimations donnent une surface totale d'encroûtements d'environ 6,35 millions de km², soit 1,7 % de la surface des océans.

Les dépôts présentant le plus fort potentiel économique sont enrichis en cobalt et en platine. Ils sont tous situés dans le Pacifique et notamment dans la ZEE de la Polynésie française avec les concentrations les plus élevées (Max. 1,8 % de cobalt et 3,5 g/t de platine) entre 1 500 et 2 000 m de profondeur.

Ces encroûtements pourraient constituer le premier minerai de cobalt, ce métal étant à ce jour un sous-produit d'autres exploitations. Sur certains sites, le platine pourrait s'avérer un sous-produit intéressant. Plusieurs éléments mineurs suscitent un intérêt croissant tels que terres rares (yttrium, lanthane, cérium), titane, thallium, zirconium, tellure et molybdène, qui peuvent être trouvés à des concentrations intéressantes. Terres rares, platine et cobalt tendent à être plus concentrés dans les encroûtements que dans les nodules (rapport de 1 à 10 pour les terres rares).

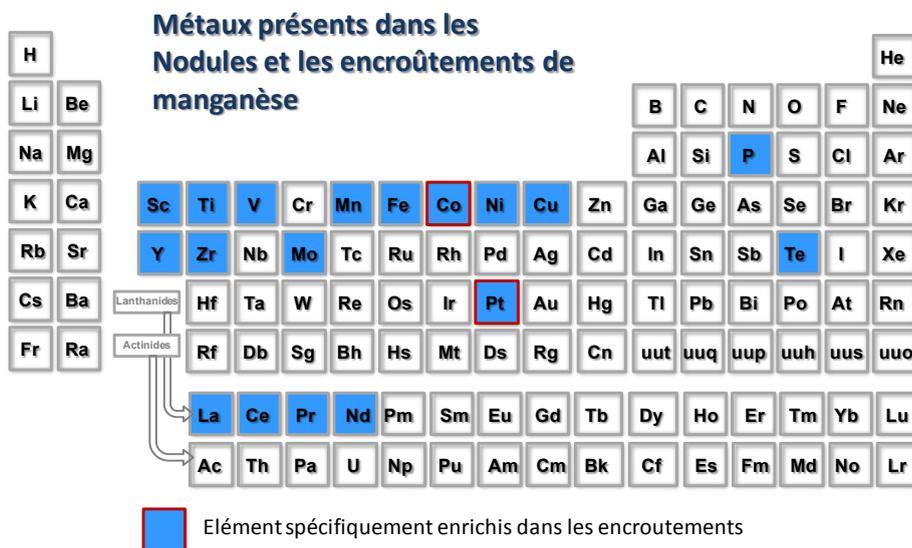


Figure A-VI-5 : Éléments enrichis dans les nodules et dans les encroûtements (Ifremer)

La connaissance partielle du mode de concentration et de la localisation des zones les plus riches en éléments rares justifie de progresser dans la connaissance des paramètres géologiques et chimiques qui conditionnent la formation des accumulations les plus riches. Au plan scientifique, des efforts demeurent nécessaires pour mieux comprendre les règles de répartition, la variabilité des épaisseurs et de composition et les processus de formation.

Sur le plan économique, beaucoup reste à faire pour évaluer les dépôts, déterminer les zones les plus riches et les plus favorables à une exploitation : terrains plats et réguliers pour ramasser sans excès de dilution. De telles zones riches en cobalt sont connues dans les Tuamotu où des croûtes forment un tapis plat et continu sur des formations sédimentaires indurées. La localisation des sites et la richesse intrinsèque minérale sont connues à grandes mailles. La cartographie fine reste à

faire, comme l'inventaire, même sommaire, de la biodiversité spécifique à ce type de formation.

Les technologies d'exploitation et les coûts associés sont encore incertains pour plusieurs raisons : pas de démonstrateur, variabilité de l'épaisseur des encroûtements (2 cm, 20 cm ?), méconnaissance des fonds, difficultés d'extraction d'où un temps de développement projeté sur 10 à 20 ans. Le jeu des acteurs concerne les espaces situés plutôt en ZEE (France, USA, Corée) tandis que Japon, Russie, Brésil, Chine ont obtenu des permis dans les eaux internationales. Il n'y a pas d'industrie et peu de publications.

(iii) Les nodules polymétalliques, dont l'intérêt vient d'être relancé du fait de la présence de métaux rares (terres rares, molybdène, tellure, vanadium, zirconium...) qui n'avait pas été prise en compte par le passé. Des nodules polymétalliques sont connus dans tous les océans, sous toutes les latitudes, à partir de fonds de 4 000 m. L'abondance sur le fond et la richesse en métaux varient beaucoup. Dès 1973, des champs à forte densité de nodules ont été trouvés le long d'une ceinture Est-Ouest dans le Pacifique nord (zone dite « Clarion-Clipperton »). Les nodules forment des boules sombres de 5 à 10 cm de diamètre contenant environ 40 % d'eau. Ils sont surtout composés d'hydroxydes de manganèse et de fer. Les couches les mieux cristallisées sont les plus riches en nickel et en cuivre qui ne forment pas de minéraux spécifiques, mais sont incorporés dans les réseaux cristallins des oxydes de manganèse et de fer.

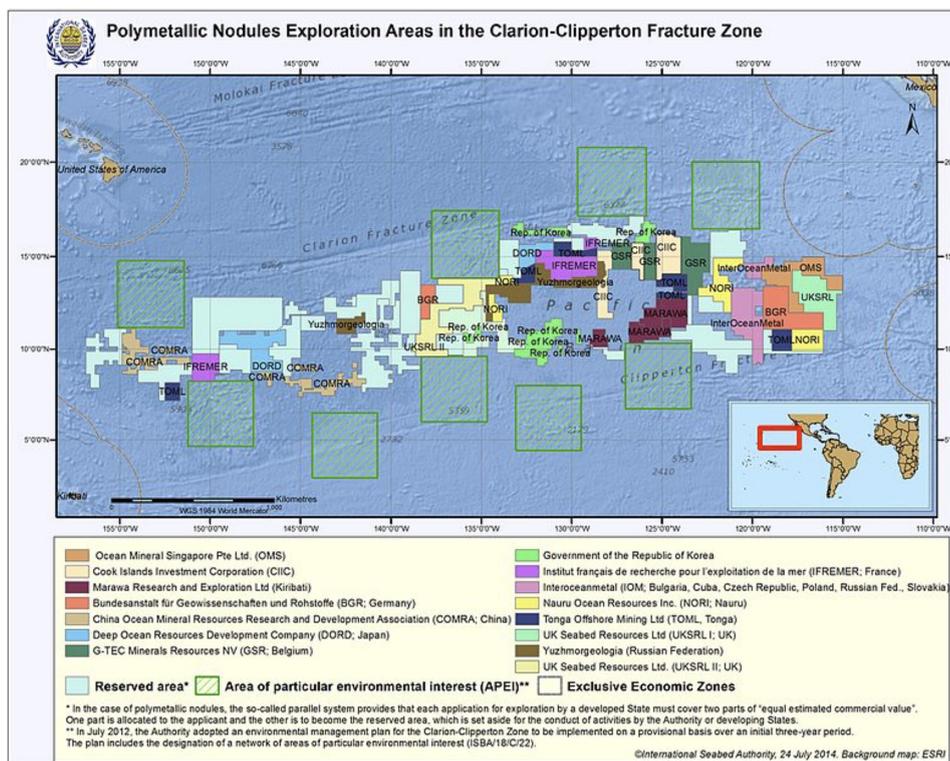


Figure A-VII-6 Les zones de nodules polymétalliques dans le Pacifique

Position des permis « Nodules » sur la bande Clarion-Clipperton (@ISA) (à noter que beaucoup des contrats obtenus auprès de l'ISA ont pris fin en 2016, seules la Chine et UK les ont actuellement renouvelés).

Les métaux de base contenus dans les nodules sont le fer (7 à 23 %), le manganèse (7 à 26 %), le cuivre (0,03 à 1 %), le nickel (0,26 – 1,28 %), et le cobalt (0,24 – 0,8 %). La zone Clarion-Clipperton présentant des teneurs intéressantes en cuivre (0,82 %), nickel (1,28 %) et manganèse (25,40 %), elle fait l'objet de nombreux permis miniers. Ce sont ces métaux qui ont été considérés dans les estimations économiques. Le cuivre est en moyenne à des concentrations doubles de celles de grandes mines andines (0,5 %) et représente environ 10 % des réserves continentales.

Les nodules peuvent être enrichis en éléments rares comme le cérium (0,1 %). D'autres éléments tels que molybdène, tellure, vanadium, zirconium et thallium peuvent être concentrés à plusieurs centaines de grammes par tonne. Les nodules peuvent ainsi être considérés comme des réserves stratégiques pour des métaux de base et pour certains métaux rares. Plusieurs pays, dont les États-Unis et l'Allemagne, ont entrepris de reprendre les analyses de leurs collections de nodules à l'aide de moyens analytiques modernes afin de préciser les variabilités de compositions en éléments mineurs et en particulier en terres rares (la France en a une grande collection à l'Ifremer et au MNHN à Paris).

Des estimations récentes sur cette zone montrent que sur une surface d'environ 9 millions de km² (soit 15 % des fonds du Pacifique situés entre 4 000 et 5 000 m de profondeur) le poids des nodules est de 34 milliards de tonnes, soit 7,5 milliards de manganèse, 340 millions de nickel, 275 millions de cuivre et 78 millions de cobalt. Les nodules contiennent aussi certains métaux en traces qui suscitent actuellement un intérêt croissant.

Les technologies d'exploitation sont encore incertaines car il n'existe pas de pilote, même s'il n'y a pas de verrou technologique. Mais la profondeur d'extraction est élevée (4 000 m.). En conséquence, le temps d'un développement éventuel est projeté sur 10 à 20 ans.

(iv) L'hydrogène naturel : L'hydrogène est généré en grande quantité lors de l'hydratation (serpentinisation) des péridotites du manteau le long des dorsales lentes ou ultra-lentes et dans les zones de subduction. De l'hydrogène par voie abiotique est produit à faible température (<20 °C) par diffusion et dégazage de monts serpentinisés « inactifs » ou à haute température (>350 °C) au niveau des cheminées hydrothermales « actives ». Depuis 1995, sept sites actifs de haute (>350 °C) ou moyenne (~90 °C) température ont été découverts le long de la dorsale médio-atlantique, à des profondeurs variant de 1 700 à 4 100 m, tous producteurs de

quantités importantes d'hydrogène. De récents travaux montrent que le phénomène de serpentinisation avec production d'hydrogène et de méthane est aussi présent sur de nombreux segments de la dorsale lente arctique ainsi que sur la dorsale indienne.

Global Distribution of Hydrothermal Vent Fields

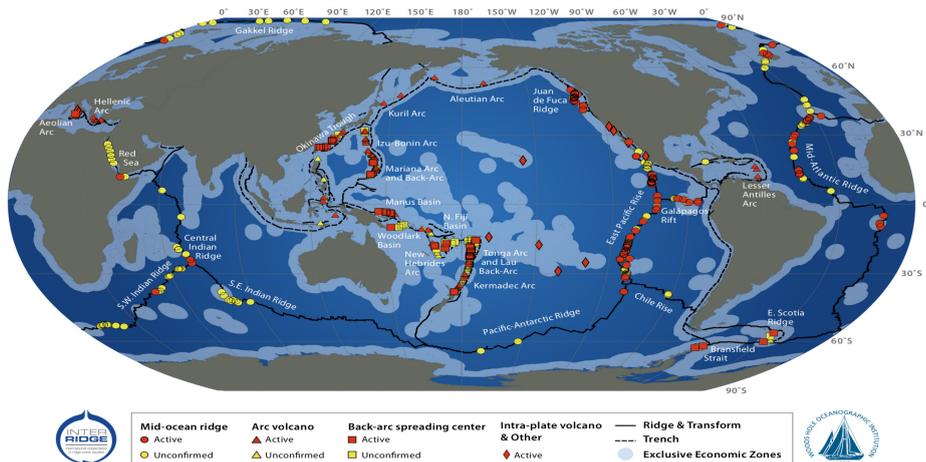


Figure A-VII-7 Distribution globale des systèmes hydrothermaux actifs océaniques en fonction des types de site

(Légende de gauche à droite : ride médio-océanique, arc volcanique, centre d'extension arrière-arc, volcans intra plaque et autres ; actifs en rouge, supposé en jaune ; traits noirs : rides et failles transformantes ; en pointillé : fosses avant arc ; en bleu les zones exclusives.). Source : Interridges (Hamington et al., 2011 ou https://vents-data.interridge.org/files/Ventmap_2009.pdf).

Les flux globaux d'hydrogène issus de la serpentinisation océanique sont pour l'instant mal connus. Les estimations, très approximatives, actuelles de ces flux varient de 5 000 à 10 000 t/an par km de ride (20 à 40 millions t/an pour l'ensemble des rides). La production mondiale d'hydrogène à partir du reformage du méthane est de 70 millions de t/an.

Les connaissances actuelles, scientifiques et technologiques ne permettent pas d'envisager une exploitation avant le très long terme.

Il s'agit d'approfondir la connaissance scientifique des processus et de quantifier les flux.

Les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines

Comme sur les continents, l'exploration et l'exploitation des ressources minérales auront des impacts environnementaux indéniables. Cependant à la différence des continents, l'environnement des fonds océaniques, et en particulier sa biodiversité, a la particularité d'être *beaucoup moins connu*.

Les impacts sur l'environnement dépendent de la nature de la ressource exploitée, des technologies utilisées, des spécificités des communautés biologiques associées, des caractéristiques de l'environnement, de la vulnérabilité et des capacités d'adaptation et de résilience des écosystèmes. Les conditions physiques, chimiques, biologiques et géologiques dans lesquelles opèrent les dispositifs miniers, influent significativement sur l'ampleur des impacts environnementaux.

Les caractéristiques des principales perturbations restent encore mal définies ou sont confidentielles. On peut cependant envisager

- sur le fond :
 - la destruction du milieu (habitats et faunes),
 - la modification du pH et de la température,
 - la mise en suspension de sédiments et de particules métalliques (parfois toxiques) et leur re-dépôt,
 - les vibrations,
 - la lumière,
 - le transfert de masses d'eau de caractéristiques physico-chimiques différentes,
 - le rejet de particules fines plus dangereuses pour les espèces que les grosses particules ;

- en surface : la dispersion de minerai depuis le navire et le bruit auxquels s'ajoutent les risques d'accidents et de pollutions associées (minerai, hydrocarbures).

La grande majorité des impacts liés à d'autres étapes que la collecte de minerai est peu documentée dans la littérature scientifique et nécessite un effort d'acquisition de connaissances. Une étude d'impact poussée et spécifique de la zone de test et des techniques/technologies mises en œuvre est indispensable. L'effet cumulatif des différents impacts de l'exploitation minière et/ou leur synergie avec les impacts d'autres activités anthropiques ou de phénomènes climatiques nécessite également d'être étudié.

À l'heure actuelle, les études d'impacts environnementaux restent circonscrites aux impacts fonctionnels sur l'environnement. Or, le bon fonctionnement des écosystèmes et l'état des divers types d'environnements déterminent la qualité et la valeur des services qu'ils rendent aux sociétés humaines. Une baisse de qualité/rendement des services est fortement susceptible d'avoir des conséquences économiques. La méthodologie d'évaluation des conséquences économiques des impacts environnementaux est à mettre en place et à systématiser.

Alors que la perspective d'une exploitation prochaine des ressources minérales profondes se précise à l'échelle internationale, nous ne connaissons que de façon très partielle ces géo-écosystèmes particuliers. Il est donc essentiel, dans le cadre d'une exploitation de ces ressources, respectueuse de l'environnement marin, de poursuivre un effort de recherche conséquent afin de mieux appréhender les processus liés au fonctionnement et aux dynamiques des géo-écosystèmes marins profonds, en s'intéressant aux questions majeures suivantes :

- quels sont les processus de formation et de transformation des éléments liés aux ressources minérales marines profondes ?

- quels processus gouvernent la variabilité naturelle et le maintien de la biodiversité des écosystèmes associés aux ressources minérales marines profondes, et soutiennent leur fonctionnement et leur métastabilité ?
- quelle peut être l'importance des impacts potentiels liés à l'exploitation des ressources minérales marines profondes et les réponses de la biodiversité et des écosystèmes dans un contexte de changement global ?

S'il est indéniable que l'apport de réponses à ces questions nécessitera de relever de nouveaux défis scientifiques et technologiques pour mener à bien les observations et l'échantillonnage requis à différentes échelles de temps et d'espace, il s'agira aussi de favoriser le développement de l'expérimentation *in situ* et en laboratoire afin de préciser les mécanismes sous-jacents au fonctionnement et à la dynamique des systèmes profonds.

D'autre part, une réflexion au moins nationale — sinon européenne — doit être menée concernant la collecte, l'archivage et la mise à disposition des données, qu'elles soient physiques, chimiques, biologiques, écologiques, économiques ou sociales, afin de faciliter le développement de modèles qui constitueront à terme, des outils incontournables pour l'élaboration de scénarios de gestion.

Références

- ▶ *Les ressources minérales marines profondes* - Synthèse d'une étude prospective à l'horizon 2030, Ifremer 2010.
- ▶ Expertise scientifique collective, *Impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes*, CNRS, Ifremer, juin 2014.
- ▶ J. Dymont, F. Lallier, N. Le Bris, O. Rouxel, P.-M. Sarradin, S. Lamare, C. Coumert, M. Morineaux, J. Tourolle (coord.), 2014. *Les impacts environnementaux de l'exploitation des ressources minérales marines profondes*. Expertise scientifique collective, Synthèse du rapport, CNRS – Ifremer, 110 p.

ANNEXE VIII

Quelques remarques sur l'économie des matières premières

La question

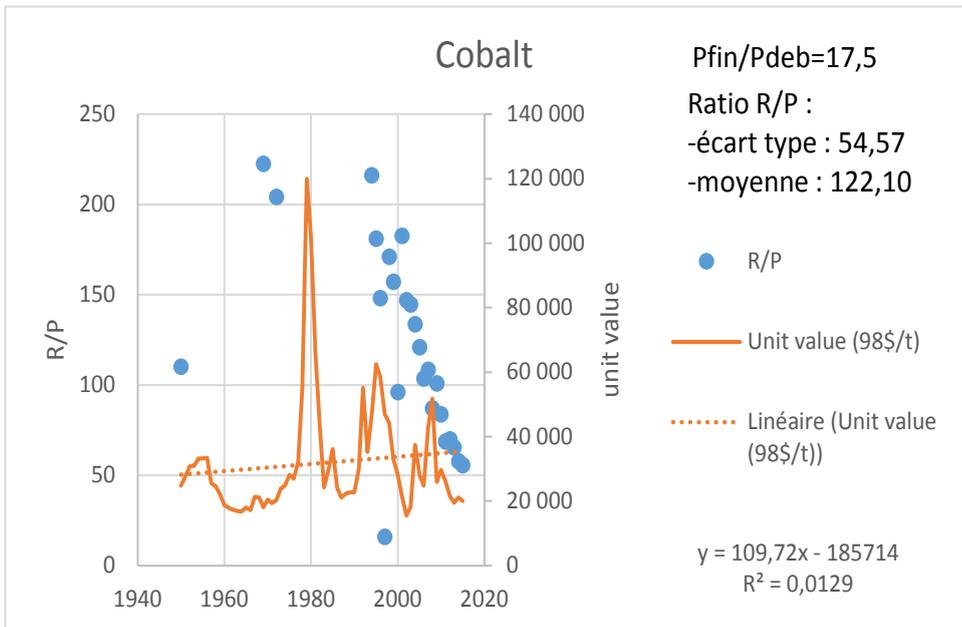
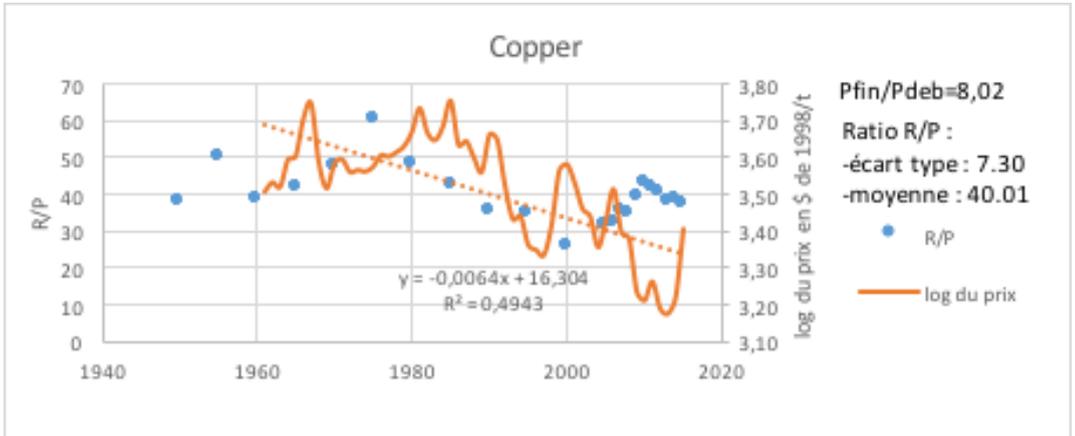
Est-il justifié de dépenser de l'argent public pour pallier d'éventuelles crises d'approvisionnement, en particulier en métaux critiques pour la transition énergétique et numérique et si oui, comment le faire au mieux ?

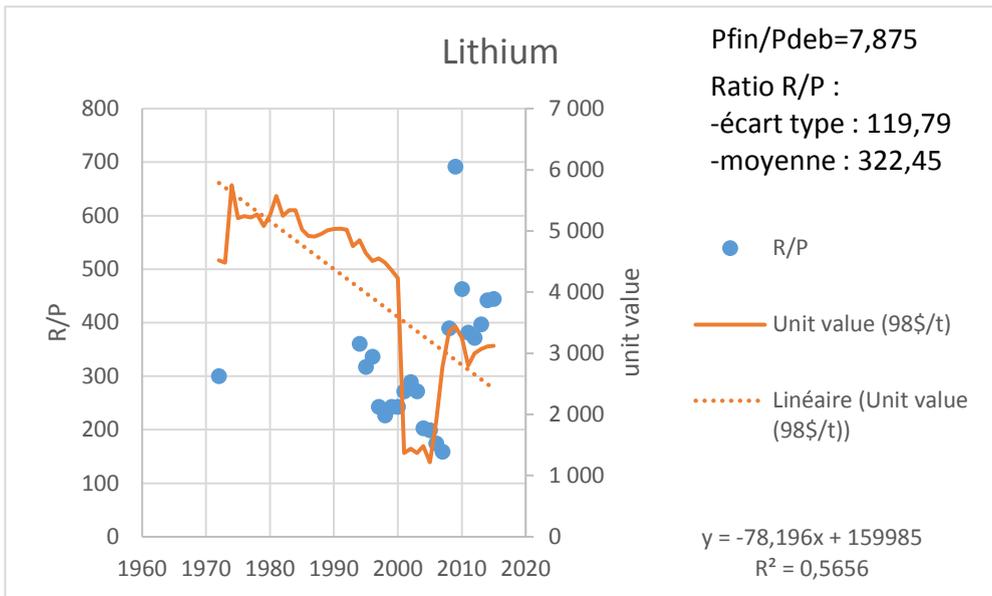
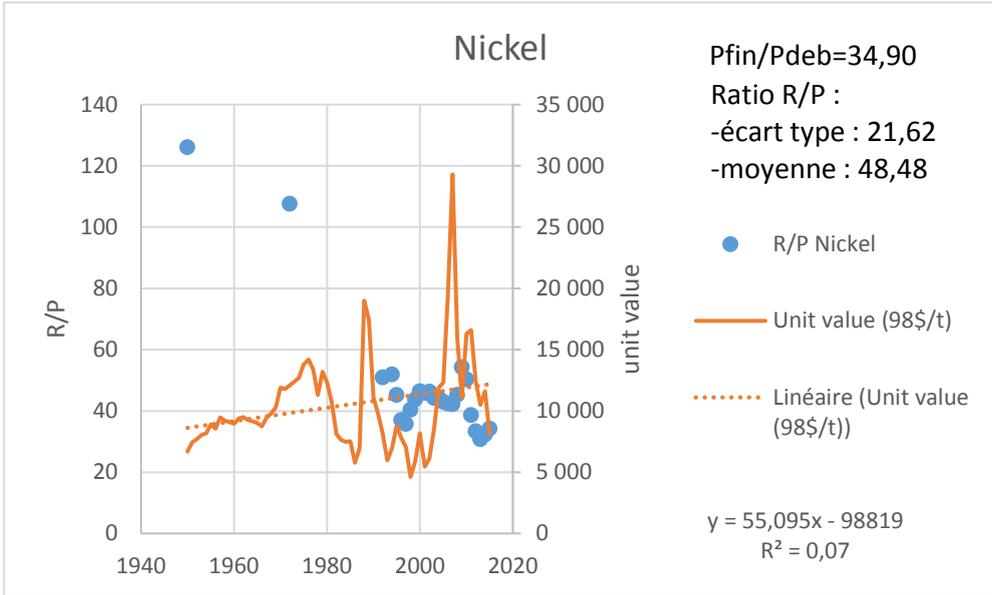
Le ratio R/P

Le ratio R/P : réserves prouvées / production annuelle, qui mesure la durée de vie des réserves à production constante, n'est pas un bon indicateur de la rareté future d'une ressource minière. En effet, les firmes minières n'ont individuellement pas intérêt à continuer de faire de la recherche-évaluation de gisements au-delà d'un certain portefeuille, autour de 30 années de réserves prouvées. Si bien qu'au plan d'ensemble, le ratio R/P reste stable, malgré de fortes augmentations de production.

Voici les cas du cuivre, du nickel, du cobalt et du lithium (tiré de la note de travail de P-N Giraud et Yosri Sakly) :

LES MÉTAUX RARES

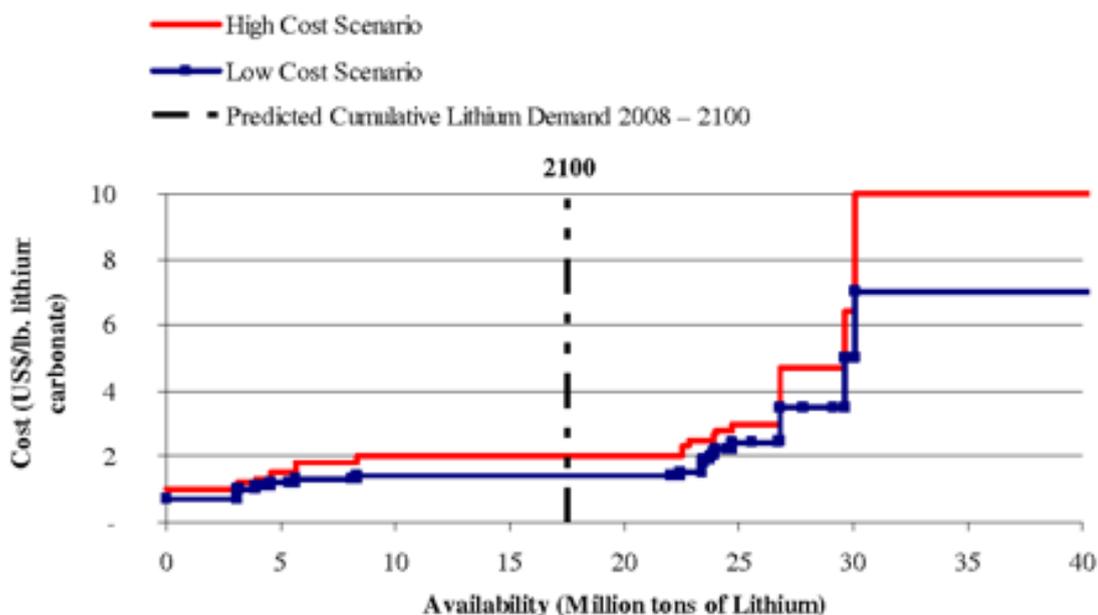




La courbe de coût de développement des réserves

Le bon indicateur de la rareté, et donc du prix futur, d'une matière minérale est la courbe de coût de développement des réserves (par définition exploitables au prix et aux techniques existantes) et des ressources dont les coûts d'extraction sont relativement bien évalués (*Reserves availability curve*, en anglais). Cette courbe donne en abscisse les volumes de productions cumulées des réserves et ressources classées par coûts de production croissants, et en ordonnée, les coûts de production de ces ressources. Voici la courbe de coût de développement à long terme du lithium, établie en 2009 par Yasik et Tilton.

Exemple du lithium



Il faudrait donc, pour tous les métaux identifiés comme critiques, construire ces courbes en repartant des données primaires. Il s'agit bien sûr de compter les ressources et pas seulement les réserves, et de placer les réserves et ressources françaises sur cette courbe. Le BRGM paraît bien placé pour cette tâche indispensable. Ensuite, s'interroger sur ce que pourrait être la tendance des gains de productivité différentiels, dus au progrès technique, dans l'exploration et l'exploitation des gisements et dans le raffinage des métaux. C'est en combinant la pente de la courbe, le coût de développement des réserves et le *trend* estimé des gains de productivité que l'on peut faire une prospective du prix à 20 ou 30 ans d'un métal donné, compte tenu de l'évolution prévisible de sa demande. Il n'y a pas d'autre méthode pour exploiter toutes les informations pertinentes disponibles.

Cette méthode suppose des marchés compétitifs ou oligopolistiques rationnels, des marchés qui, certes avec des oscillations de prix dues aux mauvaises anticipations, « fonctionnent » sans pénuries. Il est clair que ces résultats ignorent les effets perturbateurs provoqués par des monopoles malveillants ou des évènements politiques ou naturels imprévisibles. D'où la nécessité de scénarios de crise, comme indiqués ci-dessous en 6.

L'environnement

Si, en Amérique latine, en Afrique ou en Chine, l'extraction des métaux critiques se fait avec de graves atteintes à l'environnement, il est parfaitement légitime pour l'Europe de protéger son industrie locale par une taxe aux frontières d'un montant par tonne égal à la différence entre le coût d'exploitation sans souci pour l'environnement à l'extérieur et le surcoût qu'engendrera à l'intérieur l'exploitation selon les normes en vigueur en Europe. Autrement dit, nous acceptons de commercer, mais à « nos » prix

qui donnent une valeur à l'environnement. Or, on sait que nous accordons une grande valeur à la protection du capital naturel en Europe.

Que les industries européennes rentables sous cette protection douanière justifiée pour raisons environnementales se développent alors spontanément. Point n'est besoin d'argent public. Pour faire bonne mesure on peut même collecter ces taxes dans un fonds destiné à financer l'amélioration de l'exploitation dans le reste du monde. Ce principe est parfaitement admis par la Commission européenne qui l'étudie pour compenser une taxe carbone.

Exporter plus au lieu de produire à perte des métaux sur le territoire

« Pourquoi, au lieu d'importer pour 5 milliards de lithium, ne pas le produire, même à 7 milliards, chez nous, afin de ne pas laisser échapper à l'étranger cette création de valeur ? » Cette question, qui fut présente dans le débat, est incomplète. Si nous achetons pour 5 milliards de lithium en Amérique latine, nous distribuons 5 milliards de pouvoir d'achat à l'extérieur, lesquels, puisque les balances commerciales sont équilibrées par les balances des capitaux, nous reviendront sous forme d'investissements financiers ou d'achat de produits exportés par la France, pour 5 milliards. C'est bêtement comptable.

Nous aurions la même chose : le lithium, mais pour 5 milliards au lieu de 7. Nous aurons travaillé moins pour avoir la même chose, nous nous serons donc enrichis. Aurait-on songé, pour éviter la facture pétrolière, à fabriquer de l'essence et du fioul à partir du charbon restant dans les mines du Nord et de Lorraine ? La réponse a été le programme nucléaire français. De même, dans le cas du lithium ou du cobalt, la réponse n'est pas nécessairement l'exploitation de notre sous-sol avec un surcoût, mais peut aussi passer par le développement de nouvelles technologies nécessitant moins de lithium.

C'est pourquoi nous recommandons de donner mission à quelques organismes de recherche de développer des technologies qui soient plus économes en certains matériaux dont les approvisionnements peuvent se trouver contraints.

Que faire de l'argent public ?

Venons-en à la question de politique économique : que peut faire l'État pour pallier les crises d'approvisionnement ?

Mais d'abord, qu'est-ce qu'une crise d'approvisionnement ? Elle est provoquée par un acte hostile, économique ou politique, ou par un événement politique ou une catastrophe naturelle, difficiles à prévoir et anticiper. Elle provoque, dans le meilleur des cas, une flambée des prix — tous les consommateurs s'arrachant les rares stocks disponibles —, dans le pire une rupture des approvisionnements en physique, mettant dans les deux cas à mal le reste de la filière en aval sur le territoire national.

Il conviendrait donc d'abord, métal critique par métal critique, d'élaborer des scénarios de crise et de leur durée probable. Quelques mois ou plusieurs années, ce n'est pas la même chose en termes de moyens pour y faire face.

Le processus de mise sur le marché d'un métal comporte, rappelons-le, quatre étapes. La première relève de la recherche scientifique : géologie, minéralurgie, etc. Elle va jusqu'à repérer certains prospectus ou désigner des zones particulièrement favorables à l'exploration. Ces fonctions sont assurées par des services publics. Les trois autres étapes sont prises en main par des firmes privées ou des firmes publiques se comportant comme telles. L'exploration-évaluation qui produit des portefeuilles de gisement, dont on a dit (point 2 ci-dessus) que leur durée de vie n'a aucune raison microéconomique de dépasser quelques dizaines d'années. Puis la mise en place de capacités de production à partir du portefeuille de gisements, en tenant compte de leurs coûts de développement. Enfin le taux d'utilisation

des capacités afin d'agir éventuellement sur les prix à court terme. Dans les deux dernières étapes : investissements en capacités et opération des capacités, des comportements stratégiques peuvent s'exercer.

Quant aux moyens pour l'État de favoriser son industrie minière, en dehors des taxes environnementales évoquées ci-dessus au point 4, on peut en envisager trois :

- ▷ 1- L'État fait prendre en charge toutes les étapes par une firme publique éventuellement subventionnée. Cela n'a de sens économique que si l'on est ainsi persuadé de « protéger une industrie naissante » qui en très peu d'années, compte tenu des réserves nationales, va pouvoir devenir compétitive sur le marché mondial, sous éventuelles protections environnementales.
- ▷ 2- L'État peut alléger les coûts du secteur privé en allant lui-même jusqu'à l'étape 2 et en offrant aux firmes des réserves toutes évaluées. Encore faut-il qu'elles soient rentables à exploiter. Or, que sont les coûts d'exploration et d'évaluation ainsi épargnés aux firmes par rapport aux coûts d'exploitation et environnementaux ?
- ▷ 3- Quand bien même l'État constituerait un portefeuille de gisements rapidement exploitables en cas de crise, les développer prendrait au moins trois ans, et il faudrait que la crise dure longtemps pour les rentabiliser, ou alors choisir des techniques qui permettraient les fermetures-ouvertures rapides : un stock souterrain.

Mais il y faudrait aussi un stock au sol, pour les premiers mois. C'est une pratique qu'on connaît : les stocks « stratégiques ». Dans les deux cas, il s'agit en fait, pour un économiste, d'un stockage de précaution : dans le sol et plus ou moins avancé vers l'exploitation dans un cas ; sur le sol et sous forme de métal raffiné près à l'emploi dans l'autre cas.

Dans ces conditions, pourquoi ne pas stocker uniquement au sol, mais pour des temps bien plus longs, surtout pour de petits métaux dont les coûts de stockage sont faibles ? D'autant qu'un stockage stratégique

ANNEXE VIII

QUELQUES REMARQUES SUR L'ÉCONOMIE DES MATIÈRES PREMIÈRES

bien géré gagne de l'argent pour le public, puisqu'il achète bon marché et vend en période de crise. C'est donc une option peu coûteuse, à regarder de près dans tous les cas et à comparer aux options de meilleure connaissance du sous-sol.

ANNEXE IX

Tableau des abréviations

Symboles chimiques	
Ag : argent	Mo : molybdène
Al : aluminium	Nb : niobium
Au : or	Nd : néodyme
Ba : baryum	Ni : nickel
Be : beryllium	Pb : plomb
C : carbone	Pt : platine
Cd : cadmium	Ru : ruthenium
Co : cobalt	Sb : antimoine
Cr : chrome	Se : sélénium
Cu : cuivre	Si : silicium
Dy : dysprosium	Sm : samarium
Fe : fer	Sn : étain
Ga : gallium	Ta : tantale
Ge : germanium	Te : tellure
H : hydrogène	Ti : titane
In : indium	V : vanadium
La : lanthane	W : tungstène
Li : lithium	Zn : zinc
Mn : manganèse	Zr : zirconium

