

RAPPORT D'ÉTUDE  
INERIS DRS-14-142031-08993A

22/10/2014

Synthèse sur les enjeux et impacts de la relance de  
l'activité minière en France



# **Synthèse sur les enjeux et impacts de la relance de l'activité minière en France**

**Programme EAT-DRS-03 « Analyse et gestion des risques et des conséquences à long terme, liés à la présence d'exploitations minières »**

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

## PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

	Rédaction	Vérification		Approbation
NOM	Philippe GOMBERT	Arnaud CHARMOILLE	Régis FARRET	Mehdi GHOREYCHI
Qualité	Référent Technique en Hydrogéologie, ingénieur à l'unité Eaux Souterraines et Emissions de Gaz de la Direction des Risques du sol et du sous-sol	Responsable du programme d'appui DRS-03, ingénieur à l'unité Eaux Souterraines et Emissions de Gaz de la Direction des Risques du sol et du sous-sol	Responsable de l'unité Eaux Souterraines et Emissions de Gaz de la Direction des Risques du sol et du sous-sol	Directeur des Risques du sol et du sous-sol
Visa				

## TABLE DES MATIERES

<b>1. INTRODUCTION .....</b>	<b>5</b>
<b>2. LISTE DES MÉTAUX STRATÉGIQUES .....</b>	<b>7</b>
<b>3. POTENTIALITÉS D'EXPLOITATION EN FRANCE .....</b>	<b>11</b>
3.1 On-shore .....	11
3.2 Off-shore .....	12
<b>4. IMPACTS ET RISQUES POTENTIELS.....</b>	<b>15</b>
4.1 Généralités.....	15
4.2 Projets de relance minière en France.....	16
4.2.1 Projets on-shore .....	16
4.2.2 Projets off-shore .....	17
4.3 Principaux risques et impacts environnementaux identifiés .....	18
4.3.1 En phase d'exploration .....	18
4.3.2 En phase de conception .....	18
4.3.3 En phase d'exploitation.....	18
4.3.3.1 Etape d'extraction du minerai .....	18
4.3.3.2 Etape de traitement du minerai .....	19
4.3.4 En phase de réhabilitation, abandon et surveillance des sites .....	19
<b>5. CONCLUSION.....</b>	<b>21</b>
<b>6. BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE.....</b>	<b>23</b>
<b>7. LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>25</b>

## TABLE DES FIGURES

<i>Figure 1. Différents types de métaux « sensibles » (Hagelüken 2011) .....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 2. Illustration des matières premières critiques pour l'UE (Braux et Christmann 2012) .....</i>	<i>7</i>
<i>Figure 3. Extrait de la carte métallogénique de l'Europe localisant les principaux gisements européens (in : BRGM 2012) .....</i>	<i>8</i>
<i>Figure 4. Évaluation de la criticité des 14 substances ou groupe de substances étudiées par le BRGM depuis 2010 (Braux et Christmann 2012) .....</i>	<i>9</i>
<i>Figure 5. La roue des métaux (d'après Reuter in : UE 2010) .....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 6. Éléments chimiques mis en œuvre dans différentes technologies du domaine de l'énergie (Goffé (CNRS) et al 2012) .....</i>	<i>10</i>
<i>Figure 7. Représentation géographique des 169 sites sélectionnés par le BRGM (Cassard 2014) .....</i>	<i>11</i>
<i>Figure 8. Richesses minérales des fonds marins (source : IFREMER).....</i>	<i>12</i>
<i>Figure 9. Classement des matières premières en fonction du risque environnemental (EC 2010).....</i>	<i>15</i>
<i>Figure 10. PER récemment accordés dans les Pays de la Loire (Ouest-France : Guillemois 2014) .....</i>	<i>16</i>

## TABLE DES TABLEAUX

<i>Tableau 1. Propositions d'amélioration de la connaissance des métaux stratégiques (Auverlot 2013) .....</i>	<i>5</i>
<i>Tableau 2. Principaux minerais sous-marins de la ZEE française (IFREMER 2011) .....</i>	<i>13</i>

# 1. INTRODUCTION

Ce rapport s'inscrit dans le cadre du Programme d'appui aux Pouvoirs publics DRS03, intitulé « Analyse et gestion des risques et des conséquences à long terme, liés à la présence d'exploitations minières abandonnées ». Il correspond au livrable de l'opération 3, concernant les « Risques et enjeux dans le cadre de l'exploitation de mines raisonnées ». Il présente une première analyse sommaire des risques et enjeux associés à l'extraction raisonnée des métaux stratégiques, dans l'optique d'une relance de l'activité minière en France.

Outre les matières premières conventionnelles (charbons, hydrocarbures, métaux), les activités humaines modernes utilisent en effet depuis quelques années une soixantaine de nouveaux métaux, dont les platinoïdes<sup>1</sup> et les terres rares<sup>2</sup>. Ceux-ci sont tantôt qualifiés de « stratégiques », de « critiques », de « sensibles », de « mineurs », d'« essentiels » ou encore de « métaux en tension ».

Dès 2008, la Commission européenne a en effet estimé que le fait de garantir un accès fiable et sans distorsion à ces principales matières premières était un facteur essentiel pour la compétitivité de l'UE (CE, 2013). La communication du 04/11/2008, dite Initiative « matières premières », présente une stratégie pour lever divers obstacles concernant l'accès aux matières premières non énergétiques et non agricoles. Ce texte repose sur trois grands piliers :

- 1) garantir des conditions équitables d'accès aux ressources dans les pays tiers ;
- 2) favoriser un approvisionnement durable à partir de sources européennes
- 3) dynamiser l'efficacité des ressources et promouvoir le recyclage.

En France, le Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective (Barreau et al. 2013, Auverlot 2013) a émis des propositions pour améliorer la connaissance des métaux stratégiques (Tableau 1).

*Tableau 1. Propositions d'amélioration de la connaissance des métaux stratégiques (Auverlot 2013)*

## a) Pour la recherche

Propositions	Commentaire	Statut
Rechercher sur le territoire la présence de métaux stratégiques	Inventaire minier actuel date de 92 (ne traitait pas des terres rares) et limité aux 100 premiers mètres	Rôle de l'Etat : recherche de long terme Aux industriels d'intervenir pour préciser l'existence et la rentabilité des gisements
Recherche sur les ressources minières sous-marines	-Ressources importantes - Mais difficultés d'exploitation non résolues à ce jour	Rôle de l'Etat : recherche de long terme Aux industriels d'intervenir pour préciser l'existence et la rentabilité des gisements
Recherche sur l'écoconception, le recyclage, la substitution	- Cadre européen si possible	- Etat : recherche long terme, - Industriel : mise au point d'un procédé

## b) Pour la formation et le partenariat industriel

Propositions	Commentaire	Statut
Renforcer la formation Minière	Ne pas perdre les compétences Ne pas perdre l'excellence de nos formations spécialisées	- Ouverture aux étrangers via des bourses d'excellence
Favoriser des partenariats entre industriels (français et européens) du même secteur	Création en Allemagne en 2012 d'une alliance pour la sécurisation des matières premières : -servir de centrale d'achat - Prise de participation éventuelle dans des activités d'exploitation/production	- Rôle du Comes - A l'exemple de l'initiative allemande

<sup>1</sup> Les platinoïdes représentent six métaux du groupe du platine, qui sont parmi les plus rares de l'écorce terrestre (teneurs  $\leq 0,05$  g/t) : ruthénium (Ru), rhodium (Rh), palladium (Pa), osmium (Os), iridium (Ir) et platine (Pt). Voir plus de détails en Annexe A.

<sup>2</sup> Les terres rares sont un groupe de 17 métaux comprenant le scandium (Sc), l'yttrium (Y) et les lanthanides, c'est-à-dire les métaux compris entre La et Lu : lanthane (La), cérium (Ce), praséodyme (Pr), néodyme (Nd), prométhéum (Pm), samarium (Sm), europium (Eu), gadolinium (Gd), terbium (Tb), dysprosium (Dy), holmium (Ho), erbium (Er), thulium (Tm), ytterbium (Yb) et lutécium (Lu). Contrairement à ce que laisse penser leur nom, ces métaux ne sont pas forcément tous rares, à l'exception notable du rhénium (~0,001 g/t). Voir plus de détails en Annexe B.



## 2. LISTE DES MÉTAUX STRATÉGIQUES

En 2010, un comité d'experts de la Commission européenne a évalué 14 matières premières essentielles (Hagelüken 2010, CE 2011, Rabinovich 2011 : l'antimoine (Sb), le béryllium (Be), le cobalt (Co), le tungstène (W), les platinoïdes, le gallium (Ga), le germanium (Ge), l'indium (In), le niobium (Nb), le tantale (Ta), la fluorine (pour le fluor F), le graphite (C), le magnésium (Mg) et les terres rares. Ce comité d'experts prévoit, en outre, d'examiner quelques autres matières qualifiées de «quasi essentielles» : rhénium (Re), tellure (Te), hafnium (Hf), sélénium (Se), étain (Sn). La Figure 1 et la Figure 2 permettent de mieux visualiser ces matières premières et ce qui fait leur intérêt.

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
K	Ca	Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt									

\* Ce Pr Nd Pm Sm Eu Gd Tb Dy Ho Er Tm Yb Lu

Precious Metals (PM)	Semi-conductors	Rare Earth Elements (REE)	Technology metals	EU critical metals
Edelmetalle	Halbleiter	Seltene Erden		

Figure 1. Différents types de métaux « sensibles » (Hagelüken 2011)

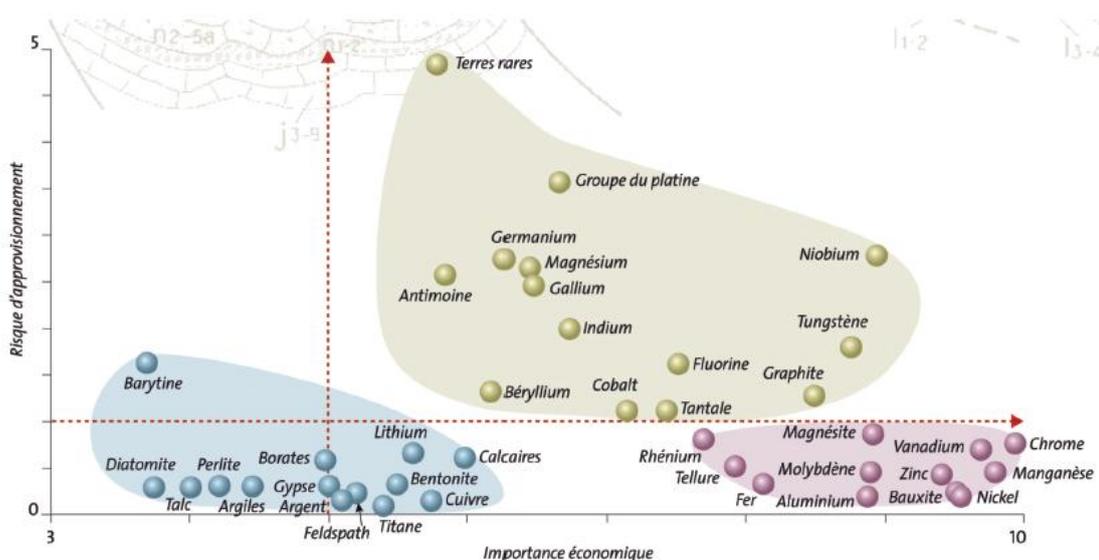


Figure 2. Illustration des matières premières critiques pour l'UE (Braux et Christmann 2012)

En 2009 est lancé le projet FP7 ProMine<sup>3</sup> avec l'objectif d'inventorier les ressources minérales du territoire de l'UE (Figure 3) et de mettre au point des procédés de valorisation des matières minérales innovants et respectueux de l'environnement.

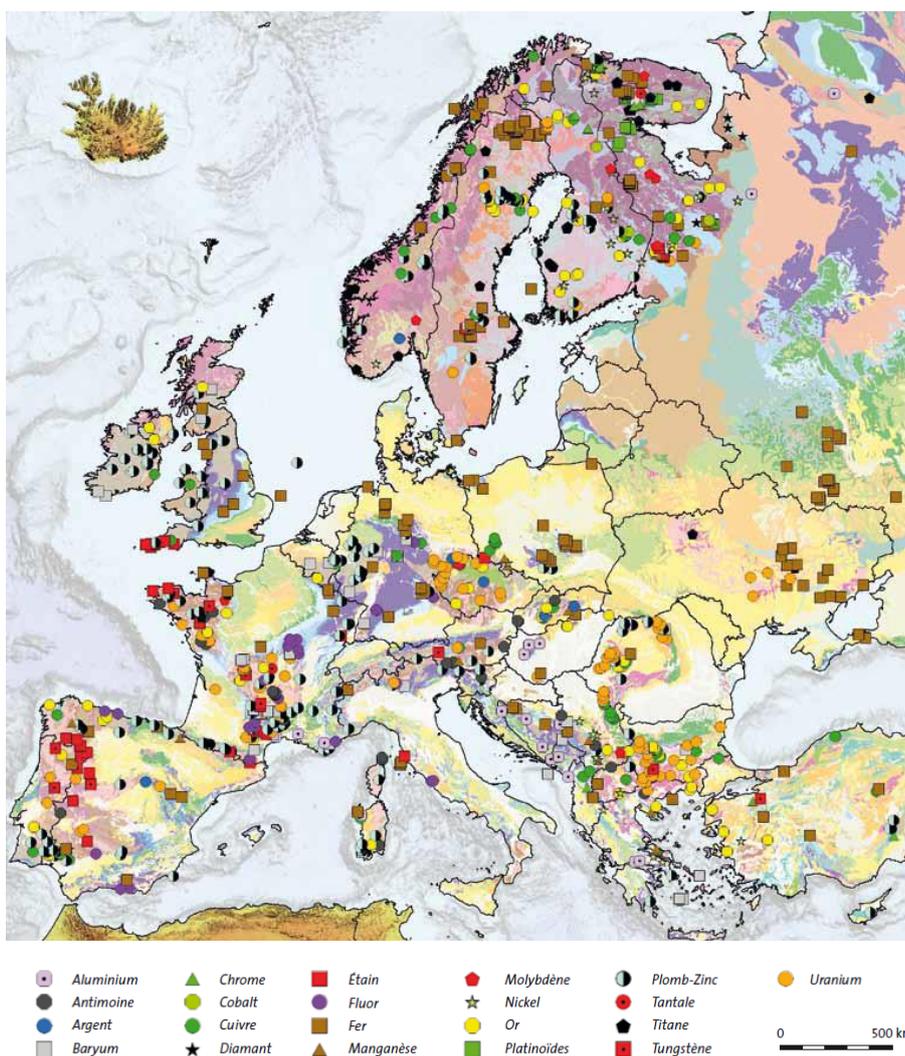


Figure 3. Extrait de la carte métallogénique de l'Europe localisant les principaux gisements européens (in : BRGM 2012)

Parallèlement, la France a créé en 2011 un Comité pour les métaux stratégiques<sup>4</sup> (COMES) qui réunit les différentes parties prenantes : ministères, établissements publics concernés (Ademe et BRGM), fédérations professionnelles, entreprises (Areva, Rhodia, Eramet...). Le but du COMES est de soutenir la conception et le suivi de la politique sur la sécurité d'approvisionnement en métaux stratégiques : il s'agit des métaux qui, produits en faibles quantités (moins de 0,3 Mt/an, à l'échelle mondiale), ne sont pas échangés sur des marchés organisés mais sont présents dans nombre de produits de consommation courante et/ou technologies à haute valeur ajoutée.

<sup>3</sup> Projet regroupant 27 partenaires dont, pour la France ; le BRGM et l'INPL (<http://promine.gtk.fi/>)

<sup>4</sup> Lancé le 30/03/2011 par Eric Besson, ministre de l'Industrie, le COMES a comme objectif de mettre en place une grande stratégie pour les matières premières, associant connaissance économique, politique minière, politique industrielle et politique internationale.

Ces métaux ne forment pas un groupe homogène du point de vue de leurs propriétés physicochimiques ou de leurs origines géologiques. Le CGSP (Barreau et al. 2013) en fournit une liste non exhaustive qui comprend les 14 matières premières essentielles recensées par l'UE plus l'arsenic (As), le bismuth (Bi), le mercure (Hg) et le strontium (Sr).

Depuis 2010, dans le cadre du COMES, le BRGM<sup>5</sup> réalise un panorama du marché de 14 autres matières stratégiques qualifiées de « principales » afin de déterminer la vulnérabilité de la France vis-à-vis de leur approvisionnement (Braux et Christmann 2012). Il s'agit de (Figure 4) : antimoine, béryllium, gallium, germanium, graphite, lithium, molybdène, niobium, rhénium, sélénium, tantale, tellure, tungstène et terres rares.

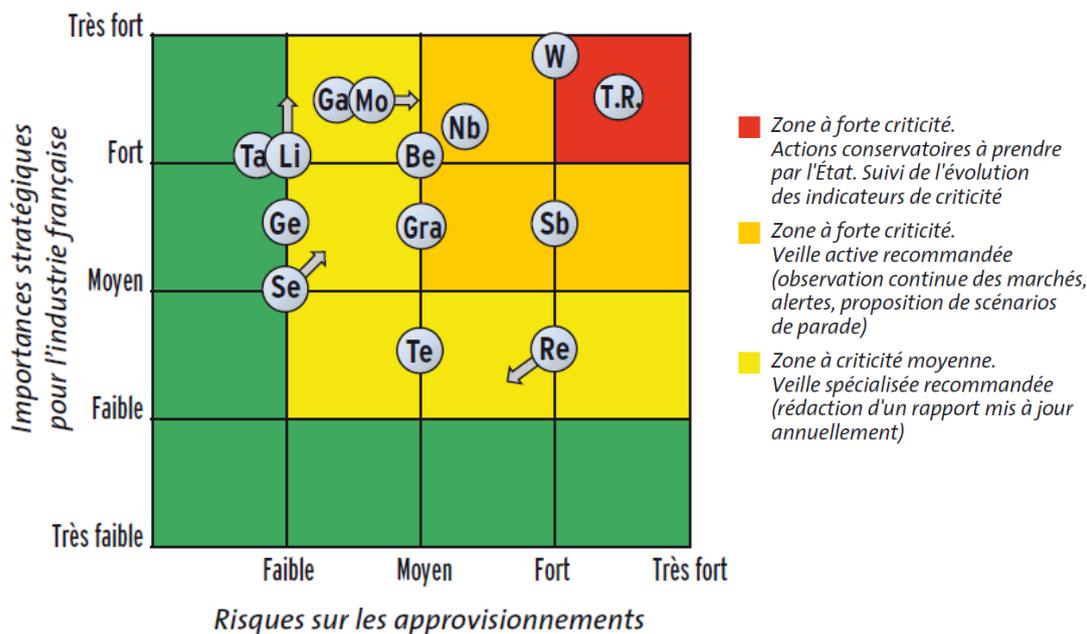


Figure 4. Évaluation de la criticité des 14 substances ou groupe de substances étudiées par le BRGM depuis 2010 (Braux et Christmann 2012)

Ces matières sont rarement exploitées pour elles-mêmes. Il s'agit plutôt de « coproduits » (Bihouix 2011) ou de « sous-produits » (Barreau et al 2013) que les processus de minéralisation ont liés - au sein des mêmes minerais - à des métaux dits « primaires » (Cu, Ni, P, Zn, Al...). La production de ces coproduits intervient donc au cours du raffinage de ces métaux primaires (métallurgie).

Présents en faibles quantités, ces coproduits ne constituent pas la substance principale recherchée. Leur exploitation ne serait d'ailleurs pas rentable en elle-même car elle dépend de l'extraction des métaux primaires auxquels ils sont associés. Elle peut toutefois contribuer à la rentabilité de l'exploitation de ces métaux principaux.

Les coproduits les plus fréquemment présents avec, entre parenthèses, les principaux métaux auxquels ils sont associés sont (Figure 5) : le cobalt (Ni, Cu), le sélénium et le tellure (Cu), l'indium (Cu, Zn), le cadmium et le germanium (Zn), l'antimoine (Zn, Pb, Au), le bismuth (Pb, W), le palladium (Pt), le gallium (Al), les terres rares (Fe), le molybdène (Au, Ag), etc.

<sup>5</sup> [www.brgm.fr/publication.jsp](http://www.brgm.fr/publication.jsp)

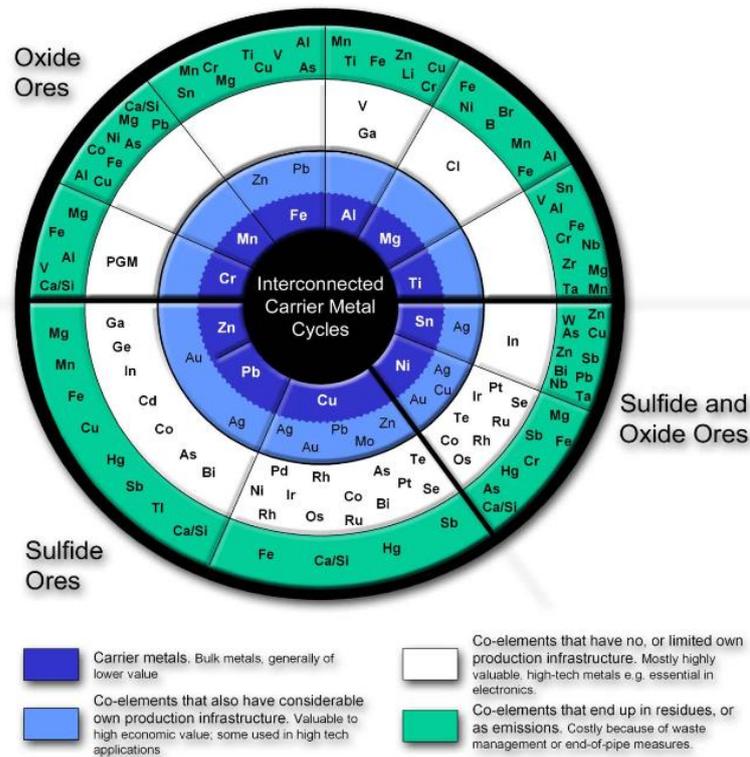


Figure 5. La roue des métaux (d'après Reuter in : UE 2010)

On notera que certains métaux ont été considérés comme stratégiques parce que leur demande a explosé du fait du développement exponentiel de l'électronique, des nouvelles technologies, de l'aéronautique, etc. (Figure 6).

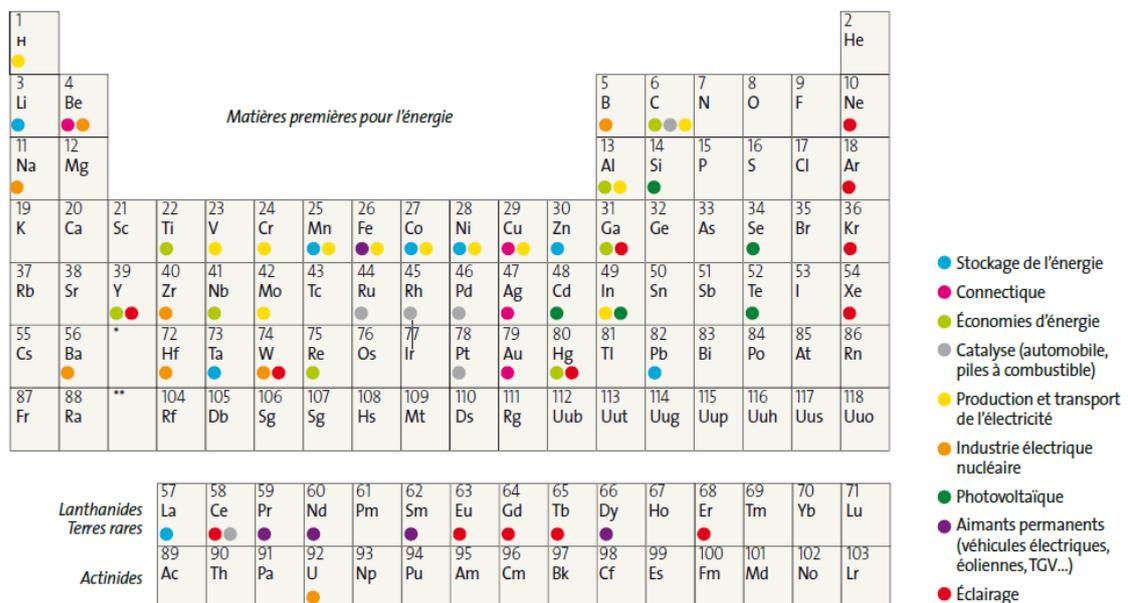


Figure 6. Éléments chimiques mis en œuvre dans différentes technologies du domaine de l'énergie (Goffé (CNRS) et al 2012)

### 3. POTENTIALITÉS D'EXPLOITATION EN FRANCE

#### 3.1 ON-SHORE

Lors du premier choc pétrolier en 1973, l'inquiétude au sujet de l'approvisionnement en matières premières minérales de l'industrie française conduit le Ministère de l'Industrie à lancer un inventaire minier. Ce travail a été confié au BRGM en 1975 puis arrêté en 1991, sans avoir été achevé, du fait de la chute du cours des métaux à partir de 1985 (Cassard 2014).

Cet inventaire a été relancé en 2010 avec la création du COMES. Actuellement, pour le compte du Ministère en charge de l'industrie, le BRGM réalise une revue de 169 cibles minières potentielles (Figure 7).

Une première analyse de 99 de ces cibles (voir Annexe D) montre qu'elles sont susceptibles de renfermer une ou plusieurs des 22 matières suivantes : Ag, As, Au, Ba, Be, Bi, Cu, F, Fe, Ge, Li, Mo, Nb, Pb, Sb, Sn, Sr, Ta, Ti, Zn, Zr, W (BRGM, 2013)

A ce jour, le potentiel en ressources minérales du sous-sol français reste donc mal connu.

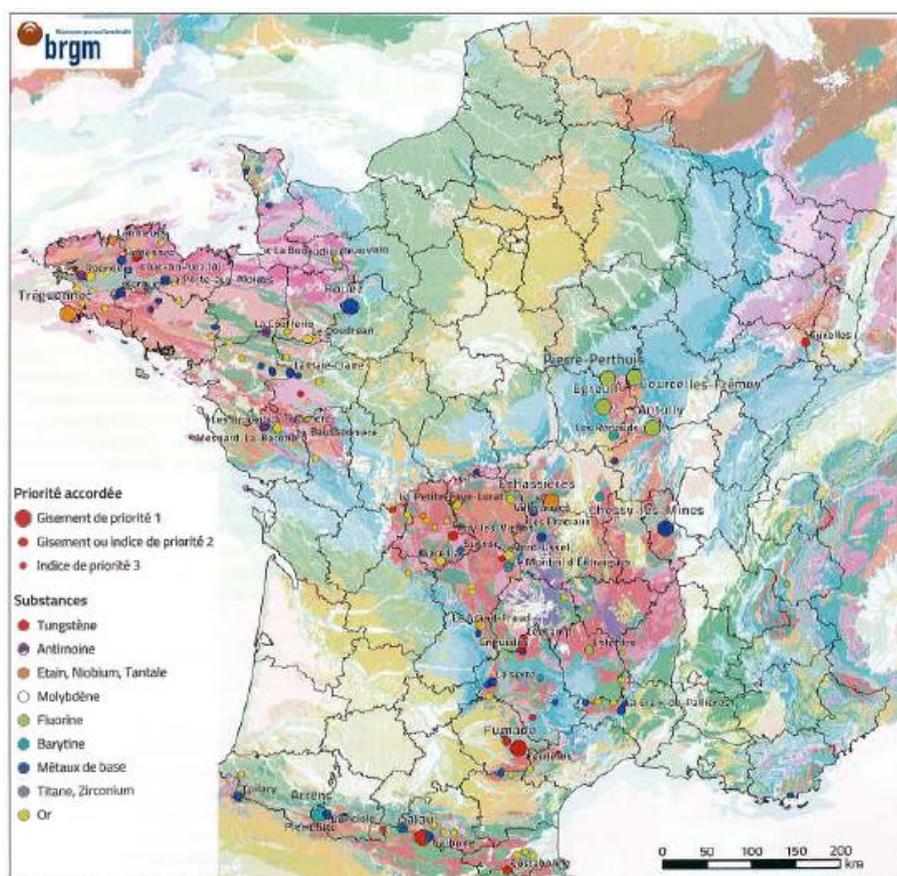


Figure 7. Représentation géographique des 169 sites sélectionnés par le BRGM (Cassard 2014)

D'après le rapport de la Mission sur la gestion durable des matières premières minérale de l'Assemblée Nationale (Bouillon et Havard, 2011), le sous-sol français, terrestre et maritime, n'est pas exempt de matières premières stratégiques pour l'industrie : cependant, les obstacles sociaux et les impératifs de protection de l'environnement risquent de limiter son exploitation. Ce document considère toutefois qu'une hausse

durable des prix, couplée à un développement des technologies extractives, pourrait rendre certains gisements rentables. Il est ainsi suggéré de mener des actions outre-mer, notamment en ce qui concerne la Guyane et la Nouvelle-Calédonie où l'inventaire des richesses minérales n'est pas terminé.

Les principaux métaux disponibles sur le territoire français, avec une estimation de leurs ressources, sont présentés en Annexe C. Il s'agit essentiellement de plomb-zinc-cuivre (5 000 kt), tungstène (66 kt), antimoine (32 kt), molybdène (~8 kt), niobium et tantale (~8 kt), béryllium (~2 kt), germanium (0,3 kt), or (~0,2 kt), sélénium (~0,02 kt), lithium (tonnage non précisé), ainsi que du cobalt en Nouvelle-Calédonie (début d'exploitation en tant que coproduit de la métallurgie du nickel).

### 3.2 OFF-SHORE

Le même document (Bouillon et Havard, 2011) mentionne que « c'est dans l'exploitation des ressources minières sous-marines que résident, en France, les plus belles promesses pour l'avenir ». Bien que la France dispose du second domaine maritime du monde, avec une Zone Economique Exclusive (ZEE) de près de 11 millions de km<sup>2</sup>, ces richesses potentielles ont à peine été explorées (Figure 8).

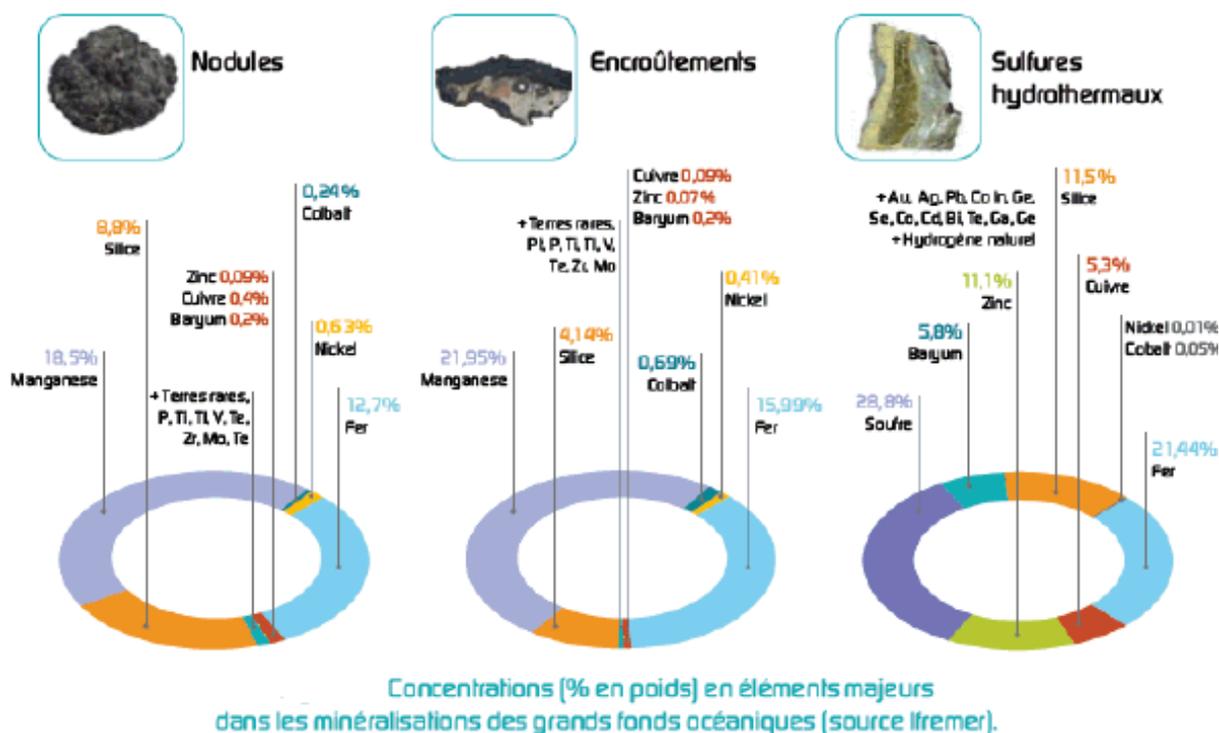


Figure 8. Richesses minérales des fonds marins (source : IFREMER)

L'IFREMER (2011) a identifié trois principaux types de sites et les ressources métalliques qui leur sont associées (voir en Annexe D) :

- les sulfures hydrothermaux (Cu, Zn, Ag, Au, Co, Se, Ni, Mo, Te, Bi, Cd, Pb, As, Sb, Ge, In, Ba) ;
- les encroûtements (Fe, Mn, Co, Pt, terres rares, Ti, Tl, Zr, Te, Mo) ;
- les nodules polymétalliques (Mn, Fe, Cu, Ni, Co, Ce, Mo, Te, Va, Zr, Tl).

Les principaux métaux susceptibles d'être extraits des fonds marins se répartissent en :

- métaux de base en tension économique probable (Z, Cu, Mn, Co, Ni, Pb, Ba, Ag) et métaux précieux (Au, Ag) ;
- métaux critiques à potentiel technologique élevé et risques d'approvisionnement majeurs (In, Ge, Cd, Sb, Hg, Se, Mo, Bi, Terres rares, platinoïdes).

L'analyse des ressources minérales marines (REMIMA) a été menée pour la France par l'IFREMER dans une projection à 2030 (Tableau 2) avec, comme priorité, l'inventaire des ressources dans la ZEE. Cependant, compte tenu du défi technologique représenté par la profondeur de certains gisements, et de la méconnaissance scientifique sur la sensibilité et la résilience des écosystèmes très particuliers qu'ils abritent, le temps de développement de ce type d'exploitation minière devrait s'échelonner sur 5 à 20 ans.

*Tableau 2. Principaux minerais sous-marins de la ZEE française (IFREMER 2011)  
(d'après le projet « Remima », REssources MInérales MARines dans une projection à 2030)*

	Métal critique Europe 2030	Métal critique USA	Présence dans Remima	Type de minéralisation océanique	Concentrations et approvisionnement
Gallium	oui	oui	à vérifier	sulfures hydrothermaux	Chine, Allemagne, Kazakhstan, Ukraine
Germanium	oui	non	oui	sulfures hydrothermaux	Chine (67 %), Russie (4 %), USA (4 %)
Indium	oui	oui	oui	sulfures hydrothermaux	Chine (52 %), Corée (14 %)
Antimoine	oui	non	sur quelques sites	sulfures hydrothermaux	Chine (89 %)
platinoïdes Ru, Rh, Pd, Re, Os, Ir, Pt	oui	oui Rh, Pt, Pd	oui	Encroûtements	Afrique du sud et Russie (90 %)
Magnésium	oui	non	oui	Sites hydrothermaux mantelliques	Chine (56 %)
Graphite	oui	non	non	-	Chine (73 %), Inde (12 %)
Tantale	oui	oui	à vérifier	-	Brésil (26 %), Mozambique (16 %), Rwanda (15 %)
Béryllium	oui	non	non	-	USA (89 %), Chine (10 %)
Fluor	oui	non	non	-	Chine (56 %), Mexique (18 %)
Niobium	oui	oui	oui	Nodules - Encroûtements	Brésil (92 %)
Terres rares La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu	oui	oui	oui	Nodules - Encroûtements	Chine (99 %)
Yttrium	oui	oui	à vérifier	-	Chine (99 %)
Tungstène	oui	non	traces	Nodules	Chine (85 %)
Argent	non	non	oui élevé	sulfures hydrothermaux	Pérou (18 %), Mexique (16 %), Chine (13 %)
Cobalt	non	non	oui élevé	Encroûtements et sulfures	Congo (51 %), Zambie (12 %)
Zinc	non	non	oui élevé	sulfures hydrothermaux	Chine (30 %), Pérou (13 %), Australie (12 %)
Cuivre	non	oui	oui élevé	sulfures, nodules, encroûtements	Chili (34 %), Pérou (8 %), Chine (7 %), USA (7 %)
Nickel	non	non	oui	Nodules - Encroûtements	Russie (17 %), Indonésie (15 %), Philippines (10 %), Nlle Calédonie (9 %)
Or	non	non	oui élevé	sulfures hydrothermaux	Chine (14 %), Australie (10 %), USA (9 %)
Titane	non	oui	oui	Nodules - Encroûtements	Afrique du sud (19 %), Australie (18 %), Chine (10 %)
Manganèse	non	oui	oui élevé	Nodules - Encroûtements - hydrothermal BT <sup>®</sup>	Chine (21 %), Australie (18 %), Afrique du sud (17 %), Gabon (11 %)
Thallium	non	oui	oui	Nodules - Encroûtements	Canada, Europe, USA
Vanadium	non	oui	oui	Nodules - Encroûtements	Chine (41 %), Afrique du sud (32 %), Russie (25 %)
Lithium	non	oui	non	non	Chili (35 %), Australie (34 %), Chine (18 %)
Tellure	non	oui	oui	sulfures hydrothermaux	Japon, Russie, Pérou, Canada
Sélénium	non	non	oui	sulfures hydrothermaux	Allemagne (30 %), Belgique (9 %), Canada (8 %)



## 4. IMPACTS ET RISQUES POTENTIELS

### 4.1 GÉNÉRALITÉS

La Mission sur la gestion durable des matières premières minérale de l'Assemblée Nationale note que le BRGM a identifié quelques gisements français présentant des concentrations que les prix élevés des matières premières pourraient porter au seuil de rentabilité (Bouillon & Havard, 2011). Il est toutefois précisé que l'image de l'activité minière au sein du public risque d'écarter la relance d'une activité minière en France. Néanmoins, s'il doit se rouvrir des mines dans des pays développés, elles devront être profondes et autant que possible respectueuses de l'environnement afin de minimiser leurs impacts en surface, tant sur les activités humaines que sur les écosystèmes.

L'UE a ainsi réalisé un classement des matières premières susceptibles d'encourir un « risque environnemental », c'est-à-dire « une réduction de l'offre justifiée par la protection de l'environnement » (EC 2010). Ce classement est basé sur une liste de matières premières critiques du fait de leur importance économique et des risques d'approvisionnement, liste à laquelle on ajoute un critère de risque environnemental. Ce classement a permis de scinder la liste de matières premières critiques en deux sous-groupes, selon le rang de leur impact environnemental (Figure 9) :

- matières à faible risque environnemental : Ti, Zn, Ag, feldspaths, Cu, Si, Al, Ni, Fe, Te, gypse, Mn, bentonite, Mo, borates, bauxite, Ta, calcaires, Va, Co, Re, Cr, Li et magnésite ;
- matières à fort risque environnemental : platinoïdes, W, graphite, fluorine, In, Be, Ni, Mg, Ga, Ge et terres rares.

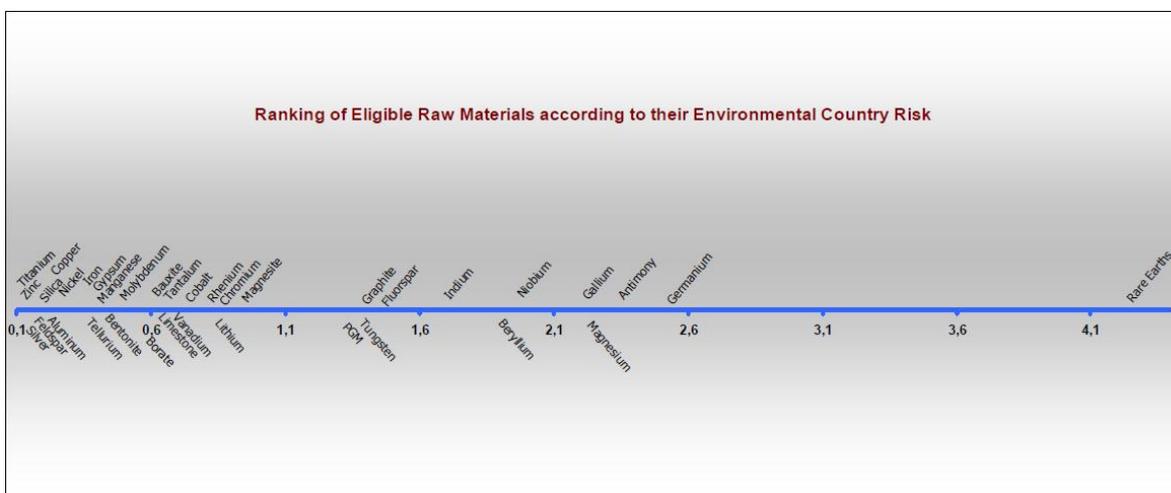


Figure 9. Classement des matières premières en fonction du risque environnemental (EC 2010)

## 4.2 PROJETS DE RELANCE MINIÈRE EN FRANCE

### 4.2.1 PROJETS ON-SHORE

D'après Ouest-France, le ministère du Redressement productif a accordé en juin 2013 à l'entreprise Variscan Mines<sup>6</sup> un permis de prospection de métaux en Sarthe et en Mayenne appelé « PER de Tennie » (Barbé, 2013) pour la recherche de cuivre, de zinc, de plomb, d'argent et d'or (Figure 10). L'investissement envisagé est de 11 millions d'euros sur 5 ans.

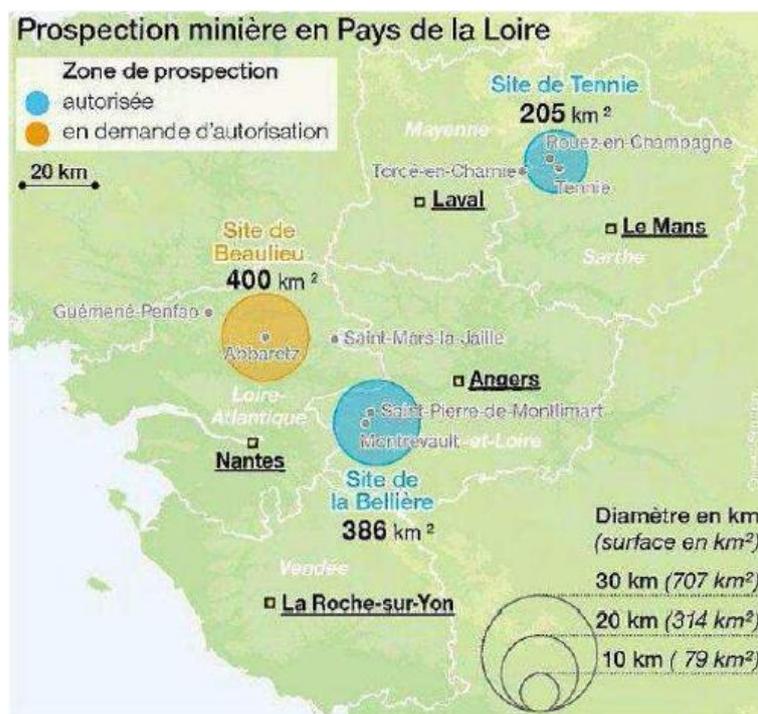


Figure 10. PER récemment accordés dans les Pays de la Loire (Ouest-France : Guillemois 2014)

La zone de prospection de 205 km<sup>2</sup> se trouve autour de l'ancien gisement de Rouez-en-Champagne (Sarthe). Au cours des deux consultations publiques qui ont eu lieu l'été 2013, la majorité des riverains s'est opposée à ce projet, notamment pour des raisons environnementales : une première exploitation réalisée entre 1989 et 1992 a en effet laissé derrière elle près de 300 000 m<sup>3</sup> de terres contaminées au cyanure. Le ministère indique qu'une commission d'information et de suivi sera créée et précise que les travaux seront « strictement encadrés », pour prendre en compte les enjeux environnementaux. D'autre part, Variscan Mines parle de son côté de « mine verte » (Bonnemaison, 2012) explique que les galeries souterraines seront profondes, jusqu'à plus de 500 m, et qu'il ne sera remonté en surface « que les gemmes exploitables, traités directement dans la mine », ce qui laissera moins de résidus (Guillemois, 2014). En outre, l'eau produite sera recyclée et une partie de l'énergie nécessaire sera produite par la mine elle-même (géothermie).

<sup>6</sup> Société d'activité de soutien aux industries extractives, créée à Orléans en décembre 2010, filiale du groupe australien PlatSearch NL ; cette société vise surtout la recherche de minerais de cuivre, de zinc, de plomb ainsi que d'autres métaux stratégiques.

La société Variscan Mines a également localisé 30 autres gisements potentiellement rentables, dont un proche de Loudéac, dans les Côtes-d'Armor.

D'après le collectif ALDEAH<sup>7</sup>, le même ministère a accordé un autre permis de recherche à Cominor<sup>8</sup> dans la Creuse en novembre 2013 : il s'agit du PER de Villaranges (Bednik, 2014). Plusieurs autres demandes sont en cours d'instruction. Parmi les métaux visés, on trouve principalement le cuivre (Tennie), l'or (Villaranges et Saint-Pierre) et l'étain (Beaulieu), mais également de nombreux autres minerais qui peuvent y être associés : zinc, plomb, argent, antimoine, tungstène, niobium, tantale, molybdène, lithium, indium, germanium.

D'après Ouest-France, une demande a aussi été déposée pour un large périmètre de 400 km<sup>2</sup> autour des anciennes mines d'étain d'Abbaretz, en Loire-Atlantique (Méas 2013, Guillemois 2014). Il s'agit de secteurs déjà exploités autrefois, pouvant receler des minerais d'or, de cuivre, d'argent, de zinc, de plomb, de tungstène ou de germanium.

#### 4.2.2 PROJETS OFF-SHORE

L'exploitation des ressources polymétalliques sous-marines devrait se heurter à des enjeux environnementaux majeurs (IFREMER 2011). Ainsi, en 1970, la prise de conscience de l'importance économique potentielle des nodules polymétalliques conduisit L. Johnson, alors Président des Etats Unis d'Amérique, à faire classer les grands fonds marins comme « patrimoine commun de l'humanité » par l'assemblée générale des Nations Unies.

Les principaux enjeux sont liés à la mise en évidence d'écosystèmes originaux et fragiles dans les zones riches en métaux : cheminées hydrothermales, pentes des monts sous-marins et sédiments des plaines abyssales.

L'IFREMER (2011) écrit : « les activités minières en milieu profond auraient différents niveaux d'impact sur l'environnement et sur la biodiversité, dont la destruction locale des habitats et des écosystèmes associés, mais aussi la perturbation du milieu (colonne d'eau et fonds) et de la diversité biologique sur une aire plus étendue et une durée bien supérieure à l'exploitation proprement dite ».

De ce fait, alors que s'amorce la phase d'exploration de ces ressources, l'institut prévient qu'il est indispensable de promouvoir en parallèle la recherche afin de mieux comprendre la diversité biologique et la dynamique de ces écosystèmes.

Après l'identification des sites à exploiter et des techniques d'extraction, « il sera nécessaire d'évaluer les conséquences directes et indirectes de l'exploitation de la ressource sur le milieu et sur la biodiversité par des approches expérimentales ou en milieu naturel ainsi que la capacité de restauration ou de résilience de l'écosystème après destruction et/ou perturbation ».

---

<sup>7</sup> Collectif « Alternatives au Développement Extractiviste et Anthropocentré », [www.aldeah.org](http://www.aldeah.org)

<sup>8</sup> Unique filiale française du producteur d'or canadien La Mancha (racheté par un égyptien) ; cette société vise surtout la recherche d'or et, éventuellement, d'autres métaux.

## **4.3 PRINCIPAUX RISQUES ET IMPACTS ENVIRONNEMENTAUX IDENTIFIÉS**

Outre une maîtrise satisfaisante des conditions d'exploitation pour en limiter les conséquences environnementales, la pertinence de l'exploitation des métaux critiques est tributaire d'une logique de rentabilité économique. L'élaboration d'une approche « coût-bénéfice » globale doit toutefois dépasser les seuls coûts liés à l'extraction et au traitement des minerais en y intégrant la notion de coût environnemental (consommation d'eau douce, pollution des écosystèmes, rejets de gaz à effet de serre, coût de la réhabilitation, surveillance à long terme...) et ce, à toutes les phases du cycle de vie d'une exploitation minière.

### **4.3.1 EN PHASE D'EXPLORATION**

Dans le cas particulier où il s'agira de mines profondes on-shore (> 1 km), la réalisation de sondages de reconnaissance fera appel à des techniques lourdes de forage impliquant la réalisation d'infrastructures routières adaptées et l'implantation de campements de longue durée. En outre, le volume de cuttings extraits sera de l'ordre de la centaine de m<sup>3</sup> par forage, ce qui nécessitera - du fait de leur volume et de leur nature - une prise en charge en tant que déchets miniers. Dans ce cas précis, l'impact environnemental ne peut plus être considéré comme négligeable, même s'il est nettement inférieur à celui des phases d'exploitation ou d'abandon.

Dans le cas d'une exploitation sous-marine, la phase d'exploration aura également un impact significatif compte-tenu de la sensibilité des écosystèmes profonds.

### **4.3.2 EN PHASE DE CONCEPTION**

La phase de conception des futures mines sera primordiale pour le « Green Mining », c'est-à-dire pour le choix des méthodes d'exploitation destinées à minimiser les interactions entre la mine et la surface<sup>9</sup>. C'est notamment à ce moment là que doivent être dimensionnées et implantées les unités de traitement des déchets liquides et solides de la phase d'exploitation, et que doit être programmée la réhabilitation du site après l'arrêt de l'exploitation minière.

### **4.3.3 EN PHASE D'EXPLOITATION**

#### **4.3.3.1 ÉTAPE D'EXTRACTION DU MINÉRAI**

Il est nécessaire d'analyser la nocivité et/ou la toxicité des produits<sup>10</sup> utilisés dans l'exploitation minière (explosifs, carburants...). La notion de réactivité des produits (entre eux et avec les terrains) et de création de « produits associés » doit être prise en compte. Des réflexions sont également à mener sur l'interdiction ou la substitution de certains produits parmi les plus critiques (tant en termes de toxicité que de quantité).

Dans le cas de creusement de galeries souterraines, particulièrement si celles-ci sont profondes, on doit ensuite étudier les remobilisations potentielles d'éléments traces minéraux ou organiques naturellement présents dans l'encaissant lorsque l'équilibre hydrogéochimique est rompu par le creusement de galeries (décompression, arrivée d'oxygène, drainage...). La caractérisation de la toxicité de ces éléments traces et l'estimation de la quantité susceptible d'être mobilisée est à prendre en compte car certains éléments particulièrement nocifs (radionucléides) sont susceptibles d'être

---

<sup>9</sup> Emissions de gaz et de poussières, rejets d'eau de mine, dépôts de déchets solides, risques de mouvements de terrain, perturbations écologiques, altération du paysage, etc.

<sup>10</sup> Principalement en cas de fuite : à travers les puits, via des migrations dans le sous-sol, du fait d'une mauvaise étanchéité des bacs ou des bassins de rétention...

remontés en surface via les eaux d'exhaure minière. On cherchera également à analyser les conséquences possibles, au regard de leur sensibilité, des ressources potentiellement atteintes par une pollution (aquifères d'eau douce, eaux superficielles, écosystèmes).

Outre son impact écologique, l'extraction du minerai peut générer les risques habituels liés aux exploitations minières classiques, sur la sécurité des personnes et des biens (travailleurs ou enjeux à proximité). Il s'agira donc de :

- Identifier les dangers et nuisances liés au fonctionnement des installations de surface. Le transport des fluides (gaz, huiles, produits chimiques, eaux souillées) doit, en particulier, être étudié.
- Considérer les nuisances liées à l'exploitation (bruits, odeurs, impact paysager, circulations d'engins...). Parmi celles-ci, l'impact des installations (et d'éventuelles exploitations à ciel ouvert) sur la qualité de l'air environnant est notamment à prendre en compte.

#### 4.3.3.2 ÉTAPE DE TRAITEMENT DU MINERAI

Il s'agit ici de gérer les déchets liquides (eaux de process, drainage des bassins de décantation) et solides (terrils, verses, schlamms...) qui seront émis par les activités de traitement du minerai et dont une partie risque de subsister après sa fermeture. A noter que c'est un problème de pollution accidentelle qui a conduit à la fermeture, en 2002, du gisement de Mountain Pass (Californie) qui assurait alors la majeure partie de la production mondiale de terres rares. On rappelle également qu'une des causes de la dominance chinoise sur la production de terres rares a ensuite été, jusqu'à récemment, la prise en compte très discutable de l'impact environnemental de ce type d'exploitation.

Les principaux thèmes liés à la gestion du risque environnemental sont les suivants :

- Définir les conditions de stockage, de traitement et de transport adéquates au regard de la nature des déchets et aux différentes étapes du processus de traitement.
- Analyser les conditions de mise en dépôt des boues de décantation et leur impact potentiel (drainage minier acide, production de poussières..).
- Tenir compte du risque de radioactivité des déchets solides (notamment pour les minerais de terres rares qui sont également riches en uranium et thorium).

#### 4.3.4 EN PHASE DE RÉHABILITATION, ABANDON ET SURVEILLANCE DES SITES

Cet axe constitue, en tant que tel, un enjeu majeur. Le code minier impose, en effet, dès la phase de conception de l'exploitation, la définition de principes de fermeture et d'abandon visant à limiter les risques et impacts résiduels à long terme sur l'homme et l'environnement. Ceci concerne les phases de réhabilitation, d'abandon, de surveillance et de suivi des sites. La différence avec la gestion des mines de substances critiques réside en partie dans le volume de roches qu'il sera nécessaire d'extraire (donc de gérer sur le long terme) du fait des faibles teneurs des minerais considérés.



## 5. CONCLUSION

En sus des matières premières conventionnelles les activités humaines modernes utilisent une soixantaine de nouveaux métaux souvent qualifiés de critiques ou stratégiques, comme par exemple les platinoïdes et les terres rares.

La Commission européenne a estimé que le fait de garantir un accès fiable et sans distorsion à ces matières premières était un facteur essentiel pour la compétitivité de l'Union Européenne. Cela implique de garantir des conditions équitables d'accès aux ressources dans les pays tiers, de favoriser un approvisionnement durable à partir de sources européennes et de dynamiser l'efficacité des ressources tout en promouvant le recyclage.

En France, en ce qui concerne les ressources on shore, un inventaire minier a été réalisé par le BRGM de 1975 à 1991, date à laquelle il a été arrêté (sans avoir été achevé) du fait de la chute du cours des métaux. Cet inventaire a été relancé en 2010 avec la création du COMES. Actuellement, le potentiel en ressources minérales du sous-sol français est en cours d'étude et reste donc globalement mal connu. Il est en cours de réévaluation par le BRGM et la Mission sur la gestion durable des matières premières minérale de l'Assemblée Nationale note d'ores et déjà l'existence de quelques gisements que les prix élevés des matières premières pourraient porter au seuil de rentabilité. Cependant, l'image de l'activité minière au sein du public risque d'écarter la relance d'une activité minière en France : ainsi, les mines qui pourraient se rouvrir devront être profondes et respectueuses de l'environnement afin de minimiser leurs impacts en surface, tant sur les activités humaines que sur les écosystèmes (notion de « Mine Verte » ou Green Mining).

En ce qui concerne les ressources off shore, la France dispose du second domaine maritime du monde avec une Zone Economique Exclusive (ZEE) de près de 11 millions de km<sup>2</sup>. A ce jour, ses richesses potentielles ont à peine été explorées par l'IFREMER. La priorité est donc là aussi de réaliser l'inventaire des ressources dans la ZEE. Cependant, compte tenu du défi technologique représenté par la profondeur de certains gisements, et de la méconnaissance scientifique sur la sensibilité et la résilience des écosystèmes très particuliers qu'ils abritent, le temps de développement de ce type d'exploitation pourrait s'échelonner sur 20 ans.

Avec l'attribution récente de plusieurs permis de prospection de métaux dans l'Ouest de la France, le gouvernement a fait un premier pas vers la relance de l'activité minière. L'exploration porte essentiellement sur la recherche de cuivre, de zinc, de plomb, d'argent et d'or mais de nombreux autres métaux associés pourraient être recherchés dans l'avenir : antimoine, tungstène, niobium, tantale, molybdène, lithium, indium, germanium.

Outre les forts besoins de connaissance liés à l'identification des ressources, les principaux besoins d'expertise concernent la maîtrise des risques et impacts environnementaux tout au long du cycle de vie de la mine : exploration, conception, exploitation (extraction puis traitement du minerai), abandon (réhabilitation ou surveillance). Pour les projets on-shore, le principal écueil sera certainement l'acceptabilité sociétale des projets miniers alors que, pour les projets off-shore, il s'agira plutôt de considérations écologiques liées à la fragilité des écosystèmes abyssaux. Dans les deux cas, l'enjeu sera de démontrer au public que les mines du futur intégreront bien la philosophie du « green mining », à savoir que leur impact environnemental aura été correctement estimé et que des actions de remédiation efficaces auront été conçues et mises en place dès la phase d'exploration et jusqu'à l'abandon final du site.

Pour 2015, l'INERIS propose donc d'analyser l'impact environnemental des exploitations minières de métaux stratégiques existantes ou abandonnées dans le monde.



## 6. BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

Auverlot D, 2013. Les approvisionnements en métaux critiques : un enjeu pour la compétitivité des industries française et européenne ? Commissariat général à la stratégie et à la prospective, Département développement durable, présentation du 10/07/2013, 34 p.

Barbé AV, 2013. L'État relance l'exploitation minière dans l'Ouest, Ouest-France, 30/06/2013, <http://www.entreprises.ouest-france.fr/node/103049>

Barreau B, Hossie G, Lutfalla S, 2013. Approvisionnements en métaux critiques : un enjeu pour la compétitivité des industries française et européenne ? Commissariat général à la stratégie et à la prospective, Département développement durable, La note d'analyse n°03, 07/2013, 16 p.

Bednik A, 2014. Bientôt, des mines près de chez vous ? Métaux, marchés et division du travail. Collectif ALDEAH, <http://www.aldeah.org>

Bihoux P, 2011. Des limites de l'économie circulaire : la question des métaux. Séminaire du 16/12/2011, Institut Momentum, 11 p.

Birraux C, Kert C, 2011. Rapport sur les enjeux des métaux stratégiques : le cas des terres rares. Compte rendu de l'audition publique du 8 mars 2011 et de la présentation des conclusions, le 21 juin 2011. OPECST, n° 3716, n° 782, 84 p.

Bouillon C, Havard M, 2011. Rapport d'information déposé par la mission sur la gestion durable des matières premières minérales. Rapport n° 3880, 164 p.

Bonnemaison M, 2012. Stratégie d'exploration minière en France au 21<sup>e</sup> siècle. Ressources minérales : la vision du mineur, Mines Paris Tech, 1-3 février 2012, 22 p.

Braux C, Christmann P, 2012. Facteurs de criticité et stratégies publiques française et européenne. Enjeux et réponses. Géosciences, N° 15, juin 2012, 48-55.

BRGM, 2011a. Le béryllium. [www.mineralinfo.org](http://www.mineralinfo.org), septembre 2011, 4 p.

BRGM, 2011b. Le rhénium. [www.mineralinfo.org](http://www.mineralinfo.org), septembre 2011, 4 p.

BRGM, 2011c. Le molybdène. [www.mineralinfo.org](http://www.mineralinfo.org), septembre 2011, 4 p.

BRGM, 2011d. Le germanium. [www.mineralinfo.org](http://www.mineralinfo.org), décembre 2011, 4 p.

BRGM, 2011e. Le gallium. [www.mineralinfo.org](http://www.mineralinfo.org), décembre 2011, 4 p.

BRGM, 2011f. Le tellure. [www.mineralinfo.org](http://www.mineralinfo.org), décembre 2011, 4 p.

BRGM, 2011g. Le sélénium. [www.mineralinfo.org](http://www.mineralinfo.org), décembre 2011, 4 p.

BRGM, 2011h. Le niobium. [www.mineralinfo.org](http://www.mineralinfo.org), décembre 2011, 4 p.

BRGM, 2012a. L'antimoine. [www.mineralinfo.org](http://www.mineralinfo.org), mai 2012, 4 p.

BRGM, 2012b. Le tantale. [www.mineralinfo.org](http://www.mineralinfo.org), mai 2012, 4 p.

BRGM, 2012c. Le lithium. [www.mineralinfo.org](http://www.mineralinfo.org), mai 2012, 4 p.

BRGM, 2012d. Le graphite. [www.mineralinfo.org](http://www.mineralinfo.org), août 2012, 4 p.

BRGM, 2012e. Le tungstène. [www.mineralinfo.org](http://www.mineralinfo.org), septembre 2012, 4 p.

BRGM, 2012. Ressources minérales. Contribution au sommet de la Terre 2012. Géosciences, N° 15, juin 2012, 110 p.

BRGM, 2013. Réévaluation du potentiel français en ressources minérales. Retraitement des données géochimiques de l'Inventaire et établissement de fiches de cibles minières. Rapport final. BRGM/RP-62960-FR, décembre 2013, 154 p.

BRGM, 2014. Panorama 2012 du marché des platinoïdes. Rapport BRGM/RP-63169-FR, janvier 2014, 216 p.

Cassard D, 2014. Ressources minières souterraines en France. Mines & carrières, n°212, mars 2014, 57-63.

CE, 2013. Rapport de la Commission au Parlement Européen, au Conseil, au Comité Économique et Social Européen et au Comité des Régions sur la mise en œuvre de l'initiative «Matières premières». COM(2013) 442 final, Bruxelles, 24.6.2013.

Christmann P, 2011. Métaux et ressources minérales stratégiques : enjeux, réponses française et européenne. Géologues, n° 170.

EC, 2010. Critical raw materials for the EU. Report of the Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials. Version of 30 July 2010, 84 p.

EC, 2014. Communication from the Commission to the European parliament, the Council, the European economic and social committee and the Committee of the regions on the review of the list of critical raw materials for the EU and the implementation of the Raw Materials Initiative. Draft note, [http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-communication\\_en.pdf](http://ec.europa.eu/enterprise/policies/raw-materials/files/docs/crm-communication_en.pdf), 7 p.

GMB, 2013. Métaux stratégiques et terres rares. Site internet de Global Metal Broker : <http://globalmetal.fr/metaux-strategiques/>

Goffé B, Christmann P, Vidal O, 2012. La recherche pour l'utilisation durable des ressources minérales. Géosciences, N° 15, juin 2012, 80-89.

Guillemois C, 2014. Pays de la Loire. Métaux rares : et si on rouvrait des mines? Ouest-France, 18/02/2014, <http://www.entreprises.ouest-france.fr/article/pays-loire-metaux-rares-s>

Hagelüken C, 2010. Critical Raw Materials: the industry's perspective (focus on recycling). EIT-KIC-RM Seminar Exploring cross-boarder collaboration in R&D, Umicore, Sept. 14th 2012, KU Leuven, 18 p.

IFREMER, 2011. Les ressources minérales profondes : synthèse d'une étude prospective à l'horizon 2030. Document de synthèse issu des conclusions du groupe de travail et des recommandations du comité de pilotage du 6 juillet 2010, 36 p.

Méas C, 2013. Maine-et-Loire. À la recherche de gisements d'or dans les Mauges. Ouest-France, 10/09/2013, <http://www.entreprises.ouest-france.fr/article/maine-loire-recherche-g...>

Mered M, 2013. La France leader mondial des terres rares? C'est possible en s'inspirant du Groenland! Note de blog, <http://www.latribune.fr>, 13/05/2013.

Rabinovich M, 2011. Métaux mineurs : une vision géologique des tensions. Géologues, n° 170

Reuter M, Guyonnet D, Bleiswitz R, 2012. Vers une utilisation éco-efficace des matières premières minérales. Géosciences, N° 15, juin 2012, 56-63.

Schulz P, 2012. Enjeux technologiques des métaux et matériaux critiques. L'approche de Renault. Géosciences, n° 15, juin 2012, 16-21.

## **7. LISTE DES ANNEXES**

<b>Repère</b>	<b>Désignation</b>	<b>Nombre de pages</b>
<b>Annexe A</b>	<b>Les platinoïdes</b>	<b>2 A4</b>
<b>Annexe B</b>	<b>Les terres rares</b>	<b>3A4</b>
<b>Annexe C</b>	<b>Les ressources françaises en autres matériaux stratégiques</b>	<b>5 A4</b>
<b>Annexe D</b>	<b>Les gisements off-shore dans la ZEE française</b>	<b>3 A4</b>
<b>Annexe E</b>	<b>Réévaluation du potentiel français en ressources minérales</b>	<b>3 A4</b>



**ANNEXE A**  
**Les platinoïdes**



## Annexe A. Les platinoïdes (synthèse du document BRGM 2014)

### Nature et propriétés

Les platinoïdes ou métaux du groupe du platine (PMG en anglais) sont 6 éléments voisins dans le tableau de Mendeleïev, possédant des propriétés chimiques comparables et pratiquement toujours associés dans les mêmes gisements : le ruthénium (Ru), le rhodium (Rh), le palladium (Pd), l'osmium (Os), l'irridium (Ir) et le platine (Pt).

A l'état pur, ce sont des métaux gris, de forte densité, avec un point de fusion élevé. Les trois derniers sont qualifiés de « platinoïdes lourds » car ils sont les éléments les plus denses connus (densité de 21 à 23, celle de l'or étant de 19,3).

Ils résistent bien à l'oxydation à l'air, quelle que soit la température, et à la corrosion chimique. L'osmium est un métal très dur mais le platine et le palladium sont relativement tendres, donc ductiles et malléables, et ont en outre des propriétés catalytiques exceptionnelles.

Sous forme métallique, ils ne sont pas toxiques (aux doses auxquelles on peut être raisonnablement confronté) mais certains de leurs composés peuvent l'être à forte dose.

### Occurrence

Ces éléments sont parmi les éléments les plus rares de l'écorce terrestre avec des teneurs inférieures à 5 mg/t, voire à 1 mg/t (Ru). De ce fait, ils sont donc considérés comme des métaux précieux, au même titre que l'or ou l'argent.

Leurs gisements sont toujours liés aux roches magmatiques basiques ou ultrabasiques d'origine mantellique et aux placers qui résultent de leur érosion. On les trouve surtout en Afrique du Sud, au Zimbabwe, en Russie et au Canada, ainsi que dans des gisements de moindre importance aux Etats-Unis, en Chine, en Australie et en Colombie.

En France métropolitaine, il n'existe pas de contexte géologique favorable à l'existence de tels gisements. On en trouve quelques uns en Guyane et en Nouvelle-Calédonie mais les premiers sont dans des zones actuellement interdites à l'exploration et à l'exploitation minière (Schéma Départemental d'Orientation Minière de 2012) et les seconds n'ont pas une taille suffisante pour être économiquement rentables.

### Utilisation

Platine et palladium, dont il est produit ~200 t /an, ont une grande importance économique, suivis par le rhodium (~25 t/an), le ruthénium et l'irridium. Le moins utilisé est l'osmium dont la production est inférieure à 1t/an.

Les usages majeurs du platine (40%), du palladium (67%) et du rhodium (81%) sont la catalyse. A l'échelle mondiale, 35% du platine part en bijouterie joaillerie mais cette proportion atteint 85% en Chine. Seul 4% du platine est impliqué dans les piles à combustibles, proportion qui devrait augmenter avec le développement de cette filière.

Le ruthénium (56%) et l'irridium (39%) sont principalement employés dans l'industrie électrique et électronique, le premier pour la fabrication disques durs, le second pour les LED. L'électrochimie vient ensuite en deuxième position, puis l'industrie chimique.

Concernant l'osmium, très peu utilisé, il n'y a pas de statistiques sur son usage. Il est rarement employé seul car, finement divisé, il se transforme spontanément en OsO<sub>4</sub> volatil et toxique. On note la présence d'alliages platine-osmium dans les stimulateurs cardiaques, les valvules cardiaques, certains contacts électriques, les pivots de boussole ou les plumes de stylo !



**ANNEXE B**  
**Les terres rares**



## Annexe B. Les terres rares

### Nature et propriétés

Les terres rares sont un groupe de métaux aux propriétés chimiques voisines comprenant le scandium, l'yttrium et les lanthanides, éléments chimiques dont le numéro atomique est compris entre 57 et 71. On distingue les terres rares légères - lanthane (La), cérium (Ce), praséodyme (Pr), néodyme (Nd), prométhéum (Pm), samarium (Sm) - et lourdes - scandium (Sc), yttrium (Y), europium (Eu), gadolinium (Gd), terbium (Tb), dysprosium (Dy), holmium (Ho), erbium (Er), thulium (Tm), ytterbium (Yb) et lutétium (Lu).

Sous forme élémentaire, les terres rares ont un aspect métallique et sont assez tendres, malléables et ductiles. Ces éléments sont souvent chimiquement assez réactifs, surtout à températures élevées ou lorsqu'ils sont finement divisés.

Deux minéraux représentent l'essentiel des réserves mondiales de terres rares : un carbonate, la bastnäsite, essentiellement présent en Chine et aux États-Unis, et un phosphate, la monazite, qui se trouve en Australie, au Brésil, en Chine, en Inde, en Malaisie, en Afrique du Sud, au Sri Lanka, en Thaïlande et aux États-Unis.

### Occurrence

Contrairement à ce que suggère leur appellation, les terres rares sont assez répandues dans l'écorce terrestre : leur Clarke<sup>11</sup> le plus élevé, celui du cérium (46-67 g/t), est du même ordre que celui du cuivre alors que le plus faible, celui du thulium (0,25 g/t), est comparable à celui de l'antimoine. Cependant, avant les années 1950, on ne savait pas séparer les différents métaux qui les constituaient et les terres rares n'avaient qu'un usage limité. Depuis lors, on est capable de séparer chacun de ces métaux et leur usage individuel a cru.

Cependant, la géopolitique des terres rares est paradoxale puisque la Chine dispose d'un quasi monopole avec 97% de la production mondiale des terres rares, alors même qu'elle n'est créditée que de 35 à 37% des réserves prouvées (Birraux & Kert, 2011). Cela provient essentiellement du fait que l'extraction et le raffinage des terres rares entraînent le rejet de nombreux éléments toxiques (métaux lourds, acide sulfurique ainsi que des éléments radioactifs) et que la plupart des pays y ont de ce fait renoncé.

L'Europe possède deux atouts pour mettre fin à ce monopole (Mered 2013). En 2008, le Danemark découvre le dépôt on-shore de Kvanefjeld, estimé comme la deuxième réserve de terres rares au monde. En 2010, les japonais repèrent des dépôts offshore dans la ZEE de Polynésie Française, pouvant représenter 30% à 50% du marché mondial mais actuellement inexplorés pour raisons (géo)politiques.

### Utilisation

Ce groupe de métaux possède des propriétés optiques et magnétiques qui les rendent essentielles pour de nombreuses applications de haute technologie (GMB, 2013). Leurs propriétés magnétiques sont utilisées dans les aimants permanents de type Nd-Fe-B qui sont les plus puissants connus aujourd'hui et sont utilisés dans les moteurs et générateurs des véhicules électriques et des éoliennes de forte puissance. Leurs propriétés optiques sont utilisées dans les ampoules de nouvelle génération.

---

<sup>11</sup> Teneur moyenne dans la croûte terrestre. Le Clarke des métaux non critiques varie de plusieurs dizaines de kg/t (Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg...) à quelques dizaines de g/t (Zn, Cu, Pb...). Les valeurs mentionnées ici sont extraites du dictionnaire de géologie de Foucault et Raoult (1988).

On les trouve également en très faibles quantités dans nombre d'autres applications comme les équipements électriques et électroniques de grande consommation (micros, capteurs, systèmes audio, disques durs, compresseurs...) mais aussi le craquage catalytique en lit fluide pour le raffinage du pétrole, les alliages métalliques, les poudres de polissage et l'industrie du verre représentent les parts de consommation de terres rares les plus importantes après les aimants, avec en tout 62% des usages en masse. Les pots catalytiques, les piles à combustible, les supraconducteurs à haute température, les lasers, satellites, missiles militaires et les nanotechnologies en sont également de grands consommateurs.

## **ANNEXE C**

### **Les ressources françaises en autres matériaux stratégiques**



## Annexe C. Les ressources françaises en autres matériaux stratégiques

### a) Tungstène

Le tungstène (W) est un métal dur, très dense, très réfractaire, très résistant à la traction même à haute température, résistant à la corrosion aux acides et à l'oxydation, et possédant un très faible coefficient de dilatation thermique (BRGM 2012e). En alliage avec les aciers, il augmente leur dureté et leur résistance à la chaleur. Combiné avec le carbone, il forme un carbure (WC) extrêmement dur. Sa consommation mondiale a été de 70 kt en 2010.

Ce métal est peu abondant (Clarke 1,3 g/t). Il en existe quelques gisements dans des gîtes stratiformes liés à des intrusions de granitoïdes.

La France fut un gros producteur de tungstène avec 12 mines exploitées dont 5 ont produit plus de 1 kt d'oxyde de tungstène (BRGM 2012e) : Salau (Ariège), Puy-les-Vignes (Haute-Vienne), Echassières (Allier), Leucamp (Cantal) et Engualès (Aveyron). Trois gisements ont encore des ressources reconnues de plus de 10 kt de WO<sub>3</sub> chacun : Montredon-Labessonnié (Tarn), Fumade (Tarn) et Coat-an-Noz (22).

Pour Cassard (2014), les ressources résiduelles en WO<sub>3</sub> atteignent ou dépassent 5 kt et les réserves-ressources 83 kt (soit 66 kt de tungstène métal). Outre les trois gisements précédemment cités, il y a également :

- les districts d'Echassières-les-Montmins (Allier) et de La Châtaigneraie (Cantal-Aveyron) ;
- la mine de Salau (Ariège) qui a produit 12 kt d'oxyde de tungstène avant sa fermeture en 1986 suite à la chute des cours, mais dont il reste du minerai à exploiter avec une teneur élevée.

### b) Antimoine

L'antimoine (Sb) est un métalloïde très peu abondant (Clarke 0,2 g/t). utilisé comme ignifugeant et stabilisateur à la chaleur dans les plastiques, le caoutchouc, les textiles, les peintures, etc. (BRGM 2012a). En alliage avec le plomb, il permet d'en augmenter la dureté, la résistance à la fatigue et à la corrosion. Les composés à base d'antimoine entrent dans la composition de nombreux produits industriels (pour lubrifiants, pigments, pesticides, catalyseurs) mais sa toxicité, limite son utilisation. Sa consommation mondiale a été estimée à 183 kt en 2010.

Les minéraux d'antimoine se trouvent en remplissage de fractures, en veines ou corps de remplacement. Aussi les gisements économiquement exploitables sont-ils généralement petits et discontinus, et l'antimoine est surtout un sous-produit de minerais de plomb-zinc ou polymétalliques (nombreux gisements plutoniques ou sédimentaires).

En France, le BRGM a dressé une liste de 55 indices dont 14 avec association d'or et 4 avec association de métaux de base (Rabinovich 2011). Parmi ces indices, on compte 22 anciennes exploitations, les plus marquantes ayant été celles de Brioude-Massiac (Cantal, Haute-Loire), de La Lucette (Mayenne) et de La Rochetréjoux (Vendée) qui ont produit 130 kt Sb jusqu'en 1992 (BRGM 2012a). Les ressources résiduelles potentielles restent notables mais la dizaine de sites connus - comme Les Brouzils (Vendée), Semnon (Mayenne) ou Valcros (Var) - sont dispersés et de petite taille, avec des réserves unitaires ne dépassant pas 10 kt.

Pour Cassard (2014), les ressources actuelles en Sb atteignent 10 kt en France et les réserves-ressources 32 kt avec le district de La Coëfferie (5 kt Sb + 2 t Au) en Bretagne et le gisement des Brouzils (5 kt Sb) en Vendée.

### c) Béryllium

Le béryllium (Be) un métal peu abondant (Clarke 6 g/t), très léger et très dur, bon conducteur électrique, réflecteur de neutrons thermiques et ralentisseur de neutrons rapides, amagnétique et transparent aux rayons X (BRGM 2011a). Son oxyde est un excellent isolant électrique et un bon conducteur thermique. En alliage avec Cu, il intervient dans la connectique des équipements électriques et électroniques. Sa consommation mondiale n'a été que de l'ordre de 320 t/an en 2010.

Les ressources potentielles de la France sont mal évaluées. Outre le gisement de Tréguennec, il existerait les sites potentiels suivants :

- les pegmatites des Monts d'Ambazac (Haute-Vienne), qui ont produit quelques tonnes au 20<sup>e</sup> siècle, ainsi que dans le Morvan, en Corrèze et dans l'Orne ;
- en association avec d'autres minéraux (kaolin, Li, W, Sn) dans le gisement d'Echassières (Allier) ;
- les indices de bertrandite<sup>12</sup> de Quily (Morbihan) et La Lauzière (Savoie).

Rabinovich (2011) signale quant à lui un site potentiel à Tréguennec (Finistère) avec des réserves de 2400 t Be (dans un minerai à 284 g/t), accompagné de Sn, Ta, Nb et Li.

#### d) Gallium, germanium et indium

Jamais exploités seuls pour eux-mêmes, ces métaux se trouvent en traces dans des minerais de métaux de base (Rabinovich 2011) : essentiellement la bauxite (Al) pour le gallium (Clarke 15 g/t), la sphalérite (Zn) pour le germanium (Clarke 2-7 g/t) et l'indium (Clarke 0,1 g/t), ou encore le charbon.

Le germanium présente une forte affinité avec le zinc et la matière organique : il est donc présent dans certains gisements de Zn et certains charbons (BRGM 2011d). Les indices de Zn en France sont nombreux mais les ressources potentielles en Zn et Ge ne sont pas chiffrées. On sait toutefois que d'anciennes exploitations plombo-zincifères étaient relativement riches en Ge : le filon à Zn-Ag de Saint-Salvy (Tarn) qui a produit 500 t Ge et contient encore 300 t de réserves, le filon à Pb-Zn-Ag de Pontpéan (Ille-et-Vilaine), le filon à Pb-Zn-Ag de Plélauff (Cotes d'Armor) et l'amas stratiforme à Zn-Pb-Ag de la Croix-de-Pallières (Gard) qui a déjà fourni 28 t Ge. A titre de comparaison, la consommation mondiale de Ge était de seulement 113 t en 2010.

Concernant le gallium, qui a une forte affinité avec la bauxite, le BRGM (2011e) note que la France a des ressources en bauxite modestes : son potentiel en Ga n'est pas évalué mais il est a priori peu important.

#### e) Niobium (ou columbium) et tantale.

Ces métaux sont le plus souvent étroitement associés (Rabinovich 2011), en particulier dans une série minérale nommée colombo-tantalite et de formule  $(\text{Fe,Mn})(\text{Nb,Ta})_2\text{O}_6$ .

Le niobium (Nb) est un métal relativement abondant (Clarke 20-24 g/t, supérieur à celui du Pb) mais produit dans très peu de pays (BRGM 2011h). Il sert à la réalisation d'aciers spéciaux pour l'aéronautique, le nucléaire et l'automobile. Sa consommation mondiale s'établit depuis 2007 aux alentours de 62 kt.

En France métropolitaine, les gites potentiels ne sont pas évalués : ils se trouveraient en Bretagne, en Alsace et au nord du Massif Central (Beauvoir-Echassières). En Guyane, il existe de petits placers alluvionnaires à colombo-tantalite, exploités de façon artisanale.

---

<sup>12</sup> Minéral découvert à Nantes et nommé en l'honneur du minéralogiste français Emile Bertrand (1844-1909).

Concernant le tantale (Ta), il s'agit d'un métal rare (Clarke 2 g/t), surtout utilisé dans les condensateurs en électronique, ainsi que dans les superalliages et les équipements exposés à de hautes températures ou à la corrosion (BRGM 2012b). Sa consommation mondiale n'atteint que 1 à 2 kt/an depuis 2000.

En France, les ressources en ces deux métaux sont de quelques kt (surtout en Guyane) mais Rabinovich (2011) cite des indices qui mériteraient d'être étudiés en métropole :

- les anciennes exploitations de kaolin de Beauvoir ;
- le site d'Echassières (Allier) avec des réserves de 5 kt Ta+Nb et 280 kt Li<sub>2</sub>O ;
- le site de Tréguennec (Finistère) avec 1,3 kt Nb, 1,6 kt Ta, 2,4 kt Be et 66 kt Li<sub>2</sub>O.

#### f) Tellure

Le tellure (Te) est un métal peu dense, photoconducteur, avec d'intéressantes propriétés sous forme d'alliages (BRGM, 2011f). Il n'existe pas de gisements spécifiques de tellure (sauf en Chine) mais il est présent dans plusieurs types de corps minéralisés, associé à Cu, Pb ou Au. Comme il est très rare (Clarke 0,002 g/t), c'est le plus souvent un sous-produit des résidus de l'électro-raffinage du cuivre. Sa consommation annuelle mondiale est estimée à environ 220 t.

Les ressources potentielles de tellure en France sont très mal connues. La plupart des gisements susceptibles d'en contenir ont été exploités et fermés, et le tellure n'y a pas été dosé : amas sulfuré à cuivre de Chessy (Rhône), amas pyriteux à or de Rouez (Sarthe), gisement d'or et d'arsenic de Salsigne (Aude), gisement d'or et d'antimoine de La Lucette (Mayenne), filons à métaux de base de Saint-Salvy (Tarn). Ces ressources potentielles restent dans tous les cas marginales, quelques tonnes tout au plus.

#### g) Sélénium

Le sélénium est un métalloïde semi-conducteur photosensible avec des propriétés photovoltaïques (BRGM, 2011g). Sa consommation mondiale était de l'ordre de 2 700 t/an en 2011.

Il n'existe pas de gisements spécifiques de sélénium qui est un métal rare (Clarke 0,1 g/t), généralement un sous-produit de traitement des minerais de cuivre. La France ne produit pas de sélénium et ses ressources sont mal connues car cet élément n'a pas été dosé dans les gisements sulfurés susceptibles d'en contenir (actuellement exploités et fermés). Le gisement de cuivre de Chessy (Rhône) pourrait toutefois en contenir une vingtaine de tonnes.

#### h) Rhénium

Le rhénium est un métal très dense, très réfractaire et présentant une bonne résistance à la corrosion, ainsi que des propriétés catalytiques intéressantes (BRGM, 2011b). Très rare sur terre (Clarke 0,001 à 0,05 g/t), c'est le dernier élément stable naturel à avoir été découvert. Sa consommation mondiale a été de 53,5 t en 2009. Il est lié à la molybdénite (MoS<sub>2</sub>) ou à des minerais de cuivre. En France, ces conditions géologiques et gîtologiques n'étant pas présentes, l'existence de ressources en Re est très peu probable.

#### i) Molybdène

Le molybdène (Mo) est un métal peu abondant (Clarke 1,2 ppm). Réfractaire à haute température, il présente un faible coefficient de dilatation thermique mais des forts coefficients de conductivité électrique et de transmission thermique (BRGM, 2011c). Résistant à la corrosion et stable chimiquement, il peut s'allier facilement avec d'autres métaux dont il améliore la dureté et la résistance à la chaleur. Sa consommation mondiale était de 233 kt en 2010.

Les gisements économiques les plus répandus sont de types porphyriques. Le molybdène peut y être le métal principal mais c'est le plus souvent un sous-produit du cuivre. En France, les ressources potentielles sont mal connues : il n'y a pas eu de production minière à part 6 kt de minerai à 0,37 % Mo à Château-Lambert (Haute-Saône). L'inventaire national a répertorié des gisements dont les teneurs connues sont infra-économiques : Beauvain (Orne) avec 42 kt de minerai à 0,02 % Mo, La Rousselière (Loire-Atlantique), Neuf-Jours (Corrèze) et Breitenbach (Bas-Rhin).

#### j) Or

En France, les réserves-ressources en Au sont de 166 t avec deux gisements de classe mondiale (Cassard 2014) : Salsigne et Rouez. L'or (Clarke 0,05 g/t) et l'argent (Clarke 0,1 g/t) sont également des sous-produits de Sb, Pb et Cu, pouvant permettre de valoriser les minerais de ces éléments.

#### k) Cobalt

Ce métal est plus abondant que le plomb (Clarke 23-25 g/t). Les latérites nickélifères sont présentes en Nouvelle-Calédonie, à Cuba, en Indonésie, au Venezuela, en Australie, au Cameroun, etc. (Rabinovich 2011). Leur exploitation artisanale est ancienne et ce n'est que récemment que l'on a débuté leur exploitation industrielle (site de Goro, en Nouvelle-Calédonie).

#### l) Lithium

Le lithium est un métal aussi abondant que le cuivre (Clarke 20-65 g/t). Son électropositivité et sa très faible densité (0,53) sont des propriétés très appréciées pour la fabrication de batteries d'accumulateurs et de piles électrochimiques (BRGM, 2012c). Sa consommation mondiale a été de l'ordre de 26 kt en 2011.

Les gisements de lithium exploités à l'heure actuelle sont majoritairement les saumures contenues dans les salars des hauts plateaux andins et tibétains. Viennent ensuite des pegmatites et coupoles granitiques à minéraux lithinifères. En France, les coupoles granitiques de Montebrias (Creuse), Tréguennec (Finistère) et Echassières (Allier) contiennent des minéraux lithinifères : seul ce dernier, exploité pour le kaolin, produit un peu de sables et graviers lithinifères. Par ailleurs il existe des saumures géothermales lithinifères dans le nord de l'Alsace.

#### m) Graphite

Le Clarke du carbone est de 200-300 g/t mais celui du graphite, qui en est une forme cristallisée, n'est pas mentionné. En France il existe des indices de graphite dans les séries métamorphiques des massifs anciens et dans les charbons métamorphisés des Alpes et des Pyrénées (BRGM, 2012d). Certains ont été exploités (7 800 t au Chardonnet, dans le Briançonnais) mais leurs ressources ne sont pas évaluées et leur inventaire incomplet. A titre de comparaison, la consommation mondiale de graphite naturel est de 0,9 à 1,1 Mt/an depuis 2005.

#### n) Plomb, zinc et cuivre

Le Clarke de ces métaux est de 16 g/t pour Pb, 55-70 g/t pour Cu et 70-132 g/t pour Zn. Le potentiel français est important avec des réserves-ressources de l'ordre de 5 Mt Pb-Zn dans plusieurs amas sulfurés dont l'exploitation est restée en projet (Cassard 2014):

- dans le Rhône, Chessy avec 5,4 Mt à 9,0% Zn, 2,3% Cu et 14% Ba ;
- dans la Sarthe, Rouez avec 70 Mt à 0,6% Cu, 1,5% Zn et des métaux précieux ;
- en Bretagne, Bodennec (2,1 Mt à 1,2% Cu et 2,9% Zn), La Porte-aux-Moines (1,9 Mt à 7,8% Zn, 1,7% Pb et 0,8% Cu) ou Guerdérien, filon reconnu en forage avec 20% Zn.
- dans les Pyrénées-Orientales, les gisements de Carboire avec 1,6 Mt à 7% Zn, de Bentailou, de Pierrefite et de Nerbiou, plus de la barytine à Arrens (ainsi que probablement des terres rares comme In et Ge).

## **ANNEXE D**

**Les gisements off-shore dans la ZEE française (source : IFREMER)**



## Annexe D. Les gisements off-shore dans la ZEE française (source : IFREMER)

### a) Les sulfures hydrothermaux

Les dépôts de sulfures hydrothermaux sont le résultat de la circulation d'eau de mer dans la croûte océanique sous l'effet de forts gradients thermiques. On les trouve sur toutes les structures sous-marines d'origine volcanique. Selon leur localisation, ces derniers présentent une grande diversité dans les caractéristiques physiques et géologiques et dans les types de métaux valorisables. On a découvert près de 150 sites hydrothermaux (Figure 11) situés entre 800 m et 4 100 m de profondeur. Ce type de minerais est en outre bien connu dans les gisements fossiles exploités à terre et anciennement formés sous la mer.

La surface de ces dépôts est souvent enrichie en cuivre et zinc dont le total dépasse 10% dans plus près de deux-tiers des sites. Cela laisse à penser que ces minéralisations sous-marines pourraient être aussi riches que leurs équivalents terrestres. Outre ces métaux, la plupart des sites peuvent présenter des teneurs intéressantes en argent, or, cobalt et en quelques autres éléments rares : sélénium, nickel, molybdène, tellure, bismuth, cadmium, plomb, arsenic, antimoine, germanium, indium et baryum.

Le temps de développement prévisible de ce type particulier de gisement est de deux à cinq ans.

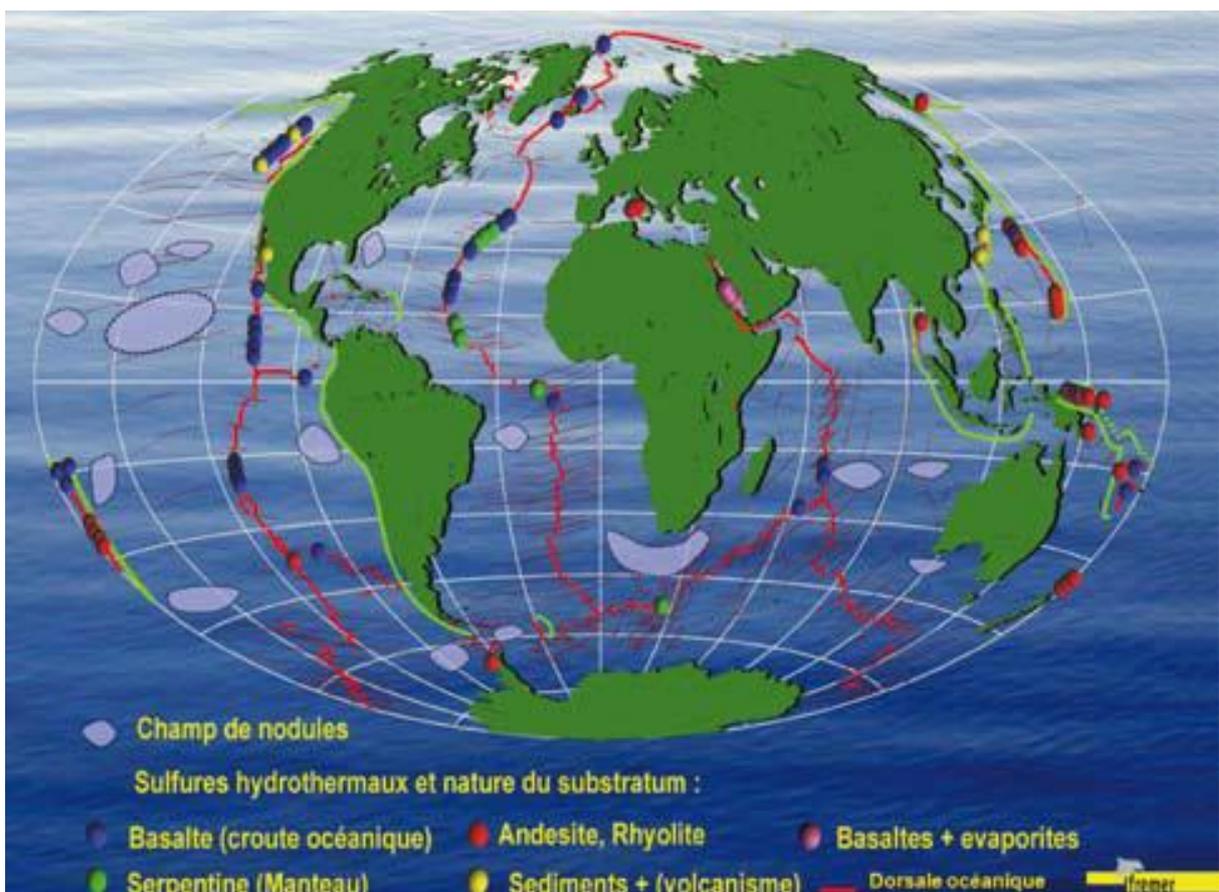


Figure 11. Sites hydrothermaux et champs de nodules à l'échelle mondiale (IFREMER 2011)

#### b) Les encroutements de cobalt et platine

Des encroûtements d'oxydes ferro-manganésifères, souvent enrichis en cobalt et en platine, ont été répertoriés dans tous les océans dans des environnements où la combinaison de courants et de faibles taux de sédimentation ont empêché le dépôt de sédiments pendant des millions d'années. Ils sont tous situés dans le Pacifique et notamment dans la ZEE de la Polynésie française, à des profondeurs de 400 à 4 000 m.

Ils peuvent avoir jusqu'à 25 cm d'épaisseur et couvrent des surfaces de plusieurs km<sup>2</sup>. Ils se déposent généralement sur des substratums indurés (volcans, anciens atolls immergés). Les estimations donnent une surface totale d'encroûtements d'environ 6,4 millions de km<sup>2</sup>, soit 1,7 % de la surface des océans mais en réalité, peu de volcans immergés ont été étudiés sur un total estimé à 50 000. De nombreux pays s'intéressent à ces ressources potentielles : Japon, USA, Russie, Allemagne, France, Corée, Royaume-Uni, Brésil, Chine.

Les concentrations les plus élevées (maximum 1,8% de cobalt et 3,5 g/t de platine) sont situées en Polynésie et pourraient constituer le premier gisement de cobalt, ce métal étant à ce jour un sous-produit d'autres exploitations (Ni par exemple). Outre la platine, plusieurs éléments mineurs tels que terres rares (yttrium, lanthane, cérium), titane, thallium, zirconium, tellure et molybdène peuvent être trouvés à des concentrations intéressantes. Cependant, si la localisation des sites et leur richesse minérale sont connues à grande échelle, la cartographie fine reste à faire et la méthode d'exploitation à développer : le temps de développement projeté est de 10 à 20 ans.

#### c) Les nodules polymétalliques

Les nodules polymétalliques sont connus dans tous les océans, sous toutes les latitudes, à partir de fonds de 4 000 m (voir Figure) mais leur abondance et leur richesse en métaux varient beaucoup d'un site à l'autre. Plusieurs pays, dont la France, ont ainsi entrepris de reprendre les analyses de leurs collections de nodules afin de préciser les variabilités de compositions en éléments mineurs et en particulier en terres rares.

Comme pour les encroutements, les nodules se trouvent également dans des zones caractérisées par un faible taux de sédimentation, notamment dans la ceinture Clarion-Clipperton, longue bande Est-Ouest du Pacifique nord dont un secteur appartient à la ZEE française. Les nodules forment des boules de 5 à 10 cm de diamètre contenant environ 40% d'eau. Ils sont surtout composés d'hydroxydes de manganèse (7 à 26%) et de fer (7 à 23%) dont les réseaux cristallins sont riches en autres métaux : principalement du cuivre (290 à 10200 ppm), du nickel (2600 à 12800 ppm) et du cobalt (2400 à 8000 ppm) mais également cérium (0,1%), molybdène, tellure, vanadium, zirconium et thallium. Les nodules peuvent ainsi être considérés comme des réserves stratégiques pour des métaux de base et pour certains métaux rares.

La zone Clarion-Clipperton fait l'objet de nombreux permis miniers, dont deux français : des estimations montrent qu'elle disposerait de 34 milliards de tonnes de nodules, soit 7,5 milliards de tonnes de manganèse, 340 millions de tonnes de nickel, 275 millions de tonnes de cuivre et 78 millions de tonnes de cobalt.

L'évaluation précise de leur potentiel implique de réaliser des cartes haute résolution, de comprendre les processus de formation des nodules les plus riches et de connaître la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes associés, afin de minimiser l'impact environnemental. Du fait d'une profondeur d'extraction élevée, le développement éventuel de ce type d'exploitation est projeté sur dix à vingt ans.

**ANNEXE E**  
**Réévaluation du potentiel français en ressources minérales**



## Annexe E. Réévaluation du potentiel français en ressources minérales

(résumé du rapport BRGM/RP-62960-FR)

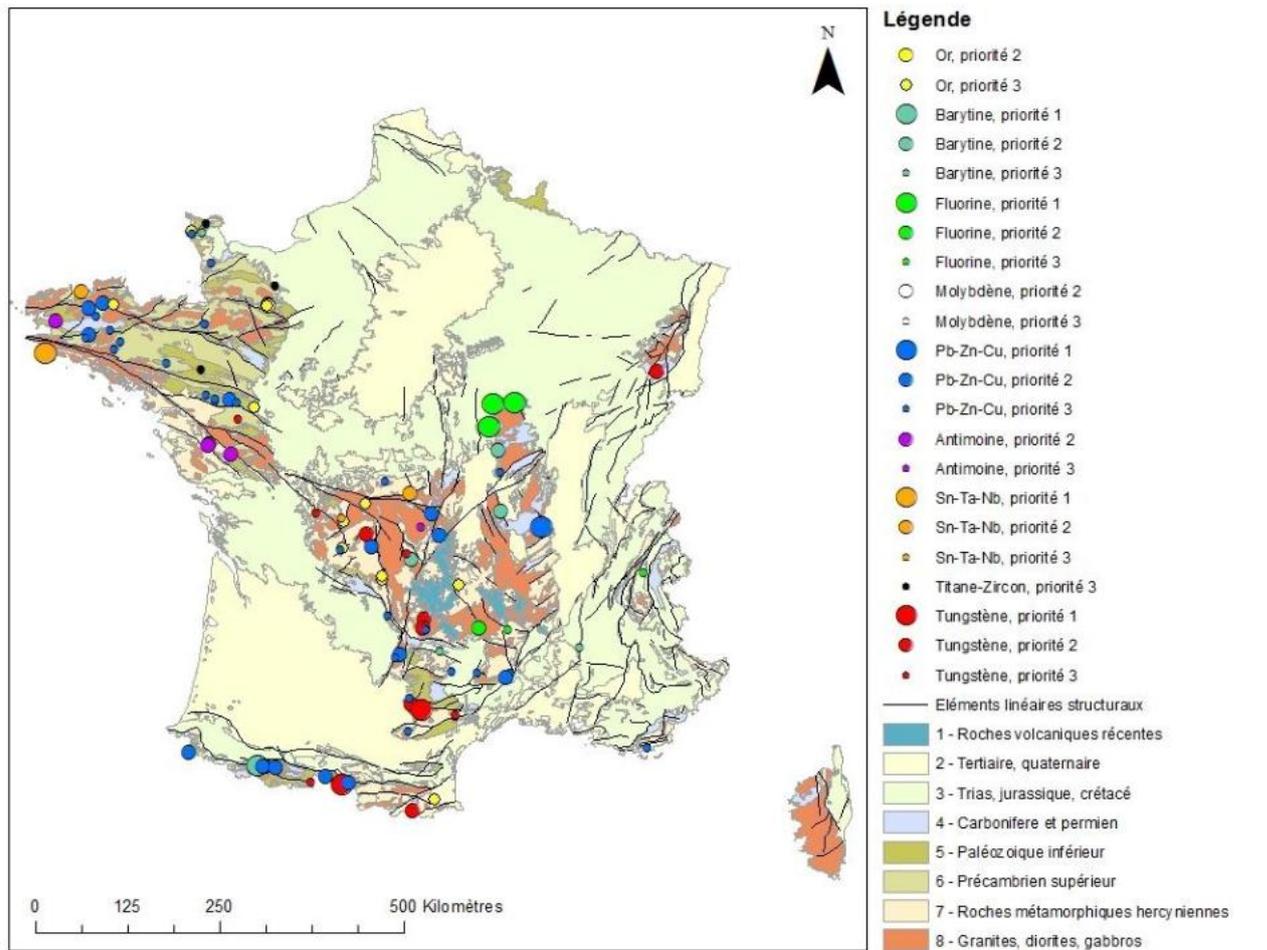
Le travail réalisé en 2013 par le BRGM a porté sur deux axes complémentaires :

- Le retraitement des données géochimiques de l'Inventaire minier français pour mieux cerner le potentiel de développement de chaque cible étudiée et éventuellement réévaluer leur niveau de priorité ;
- L'étude de cibles minières sélectionnées en accord avec le Bureau des ressources minérales (MEDDE) parmi les sujets miniers identifiés en 2012 (tableau 1 du rapport BRGM/RP-61745-FR) en portant une attention particulière aux sujets de priorité 3, souvent assez peu étudiés, et dont le potentiel de développement reste in fine assez mal connu.

A fin 2013, les résultats suivants ont été obtenus :

- A partir d'une liste de 99 cibles à réévaluer établie en concertation avec le Bureau des ressources minérales, 27 cibles ont été sélectionnées pour être étudiées en 2013 ; ces cibles sont présentées sur la figure de la page suivante ; elles sont susceptibles de renfermer une ou plusieurs des 22 matières suivantes : Ag, As, Au, Ba, Be, Bi, Cu, F, Fe, Ge, Li, Mo, Nb, Pb, Sb, Sn, Sr, Ta, Ti, Zn, Zr, W ;
- Le retraitement des données géochimiques de l'Inventaire minier français a été achevé pour l'ensemble de la France métropolitaine (Corse incluse). Parmi les anomalies géochimiques mises en évidence, ce travail a permis (i) de définir les environnements géochimiques de chacune des 27 cibles sélectionnées et (ii) de réévaluer le potentiel de développement de plusieurs cibles ;
- L'étude des 27 cibles sélectionnées a été achevée et un tableau synoptique de référence a été réalisé. Parmi ces 27 cibles, 8 ont vu leur priorité réévaluée à la hausse, et 2 à la baisse. Un processus automatisé de mise en forme des fiches descriptives a été mis au point, permettant de générer celles-ci à partir du tableau synoptique de synthèse. Le SIG national dont la réalisation a été entreprise en 2012 a été actualisé pour les nouvelles couches de données produites en 2013.

Ces travaux seront poursuivis en 2014 et au-delà, afin de traiter les 72 cibles minières restantes.



Carte des 99 cibles minières retenues pour réévaluation, classées par substance et priorité (BRGM, 2013)