



La recherche pour l'utilisation durable des ressources minérales

Bruno Goffé, Patrice Christmann, Olivier Vidal

► To cite this version:

Bruno Goffé, Patrice Christmann, Olivier Vidal. La recherche pour l'utilisation durable des ressources minérales. Géosciences, 2012, 15, pp.80-89. hal-01059713

HAL Id: hal-01059713

<https://brgm.hal.science/hal-01059713>

Submitted on 1 Sep 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'utilisation éco-efficace des matières premières minérales non renouvelables est l'une des conditions du développement durable. Au moment de Rio+20, le défi reste considérable. La recherche est nécessaire au développement de l'économie circulaire et pour trouver des solutions afin de produire – avec moins d'eau, d'énergie et de déchet – les ressources primaires dont le monde aura besoin au cours des prochaines décennies. Cet article présente une introduction à la recherche française et européenne actuellement déployée dans le domaine des matières premières minérales.

**Pilote hydrométallurgique
du groupe ERAMET (Trappes, France).**

ERAMET hydrometallurgical pilot at Trappes, France.

© Groupe ERAMET

La recherche pour l'utilisation durable des ressources minérales



80



Bruno Goffé

DIRECTEUR DE RECHERCHE, INSU,
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
bruno.goffe@cns-dir.fr

Patrice Christmann

BRGM, DIRECTION DE LA STRATÉGIE,
DIRECTEUR ADJOINT,
RESPONSABLE DE LA STRATÉGIE DU GROUPE BRGM
EN MATIÈRE DE RESSOURCES MINÉRALES
p.christmann@brgm.fr

Olivier Vidal

DIRECTEUR DE RECHERCHE, INSU,
CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
olivier.vidal@obs.ujf-grenoble.fr

La fin des tensions géopolitiques est-ouest marquées par la chute de l'URSS en 1991, la prévalence du modèle économique de la démocratie libérale, les progrès technologiques diminuant le prix de revient des matières premières minérales, le développement rapide des technologies de l'information et des techniques financières ont entraîné le désintérêt des politiques publiques occidentales pour les enjeux liés aux ressources minérales. Les gouvernements ont alors cru que la dérégulation des marchés créerait les conditions nécessaires à un approvisionnement « équilibré » au niveau mondial. L'effort de recherche français et européen a beaucoup souffert de ce désintérêt. La fin de l'inventaire minier national français en 1992, l'arrêt du programme européen Brite-Euram en 1998 ont été des jalons importants de cette longue « traversée du désert » qu'a connue la recherche.

L'émergence rapide de la Chine, à partir de 2002-2003, en tant qu'acteur majeur de l'industrie minérale mondiale et la mise en place par un nombre croissant de pays de barrières tarifaires et non tarifaires sur leur

“
Aujourd'hui, c'est
la quasi-totalité
des éléments naturels
du tableau de Mendeleïev
qui est utilisée.”

Fig. 1 : La métallurgie de métaux rares, tels que le béryllium, constituant le cœur des miroirs dorés à l'or fin du télescope spatial James Webb, est un domaine important de la recherche, indispensable à de nombreuses applications industrielles de haute technologie.

Fig. 1: Rare metals metallurgy, such as for the production of beryllium making up the gold-plated mirrors of the James Webb space telescope, is a research area essential to numerous high-tech industrial applications.

© Nasa



commerce ont modifié la situation, rétablissant les matières minérales comme un sujet important des agendas politiques, vu la grande dépendance de l'Union européenne par rapport à ses importations. Cette situation est exacerbée par le développement rapide des technologies de l'information et de la communication. La recherche de nouveaux modes de production énergétique et de filières dites « vertes » est à l'origine d'un intérêt sans précédent pour de nombreux métaux rares indispensables aux filières high-tech (figure 1). Le nombre d'éléments aujourd'hui indispensables dans le domaine de l'énergie a augmenté de manière spectaculaire (figure 2) : alors qu'une petite vingtaine d'éléments du tableau périodique était utilisée au milieu du XX^e siècle, aujourd'hui, à l'exception de quelques éléments rarissimes (prométhium, rubidium, technétium) ou sans usage industriel à grande échelle (thorium), c'est la quasi-totalité des éléments naturels du tableau de Mendeleïev qui est utilisée.

1 H 																	2 He				
3 Li 	4 Be  	<i>Matières premières pour l'énergie</i>														5 B 	6 C   	7 N	8 O	9 F	10 Ne 
11 Na 	12 Mg															13 Al  	14 Si 	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar 
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti 	23 V 	24 Cr 	25 Mn  	26 Fe  	27 Co  	28 Ni  	29 Cu  	30 Zn 	31 Ga  	32 Ge	33 As	34 Se 	35 Br	36 Kr 				
37 Rb	38 Sr	39 Y  	40 Zr 	41 Nb 	42 Mo 	43 Tc	44 Ru 	45 Rh 	46 Pd 	47 Ag 	48 Cd 	49 In  	50 Sn	51 Sb	52 Te 	53 I	54 Xe 				
55 Cs	56 Ba 	*	72 Hf 	73 Ta 	74 W  	75 Re 	76 Os	77 Ir	78 Pt 	79 Au 	80 Hg  	81 Tl	82 Pb 	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn				
87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Sg	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Uub	113 Uut	114 Uug	115 Uup	116 Uuh	117 Uus	118 Uuo				
<i>Lanthanides Terres rares</i>			57 La 	58 Ce  	59 Pr 	60 Nd 	61 Pm	62 Sm 	63 Eu 	64 Gd 	65 Tb 	66 Dy 	67 Ho	68 Er 	69 Tm	70 Yb	71 Lu				
			<i>Actinides</i>			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U 	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr	

Matières premières pour l'énergie

Fig. 2 : Éléments chimiques mis en œuvre dans différentes technologies du domaine de l'énergie.

Fig. 2: Chemical elements used in different technologies relevant to the energy sector.

BRGM – P. Christmann

- Stockage de l'énergie
- Connectique
- Économies d'énergie
- Catalyse (automobile, piles à combustible)
- Production et transport de l'électricité
- Industrie électrique nucléaire
- Photovoltaïque
- Aimants permanents (véhicules électriques, éoliennes, TGV...)
- Éclairage

Cette diversification rapide n'a pas été accompagnée d'un développement des connaissances relatives à la genèse et aux contrôles de leurs gisements. La situation de tension sur les matières premières, notamment sur leurs prix, en \$ US courants (minerai de fer = 1 100 %, cuivre = 550 %, dysprosium = 6 200 %, entre 2002 et 2012)⁽¹⁾, les tensions géopolitiques, énergétiques et environnementales ont fait émerger, au plus haut niveau politique et industriel européen, l'idée que la recherche doit être l'une des forces motrices de l'initiative matières premières de la Commission européenne. La Commission vient de confirmer cette stratégie avec force en plaçant celle-ci au cœur des priorités d'« Horizon 2020 », le futur programme-cadre de recherche et de développement 2014-2020.

Cette recherche devrait permettre d'améliorer notre connaissance du sous-sol continental européen qui reste largement sous-exploré en dehors des ressources minérales les plus usuelles, de leurs gisements affleurants ou très proches de la surface, ainsi que de son vaste domaine océanique. Elle est également nécessaire pour mieux connaître la formation des gisements de métaux rares, améliorer les techniques d'exploration, d'exploitation et de traitement des ressources minérales, jusqu'à leur métallurgie, afin non seulement de mieux valoriser les ressources, mais aussi de réduire les consommations d'intrants (eau, énergie, produits chimiques) et les rejets gazeux, liquides et solides dans l'environnement.

Les contraintes environnementales sont encore accrues par les impacts du changement climatique, par la nécessité du partage de l'espace et des usages du sol et du sous-sol et par la raréfaction des ressources facilement exploitables. Cette raréfaction nécessite de rechercher des gisements plus profonds, généralement cachés. Leur recherche et leur mise en valeur obligent à développer la connaissance géologique en 3D et 4D – un développement qui sera probablement le grand chantier des géosciences du XXI^e siècle – ainsi que de nouvelles techniques d'exploration et d'exploitation, de traitement de minerais complexes sur des grands volumes de matière avec, potentiellement, de forts impacts environnementaux.

Dans ce contexte, la formation est un enjeu central. Elle devra aider à préparer et accompagner l'adaptation consécutive des réglementations, le fonctionnement

Le développement de la connaissance géologique en 3D et 4D sera probablement le grand chantier des géosciences du XXI^e siècle.

des institutions, et notamment de l'économie, ainsi que l'éducation du citoyen.

Une véritable communauté française et européenne de la recherche sur les ressources minérales doit être ainsi constituée rassemblant les sciences de la matière, de l'environnement, économiques, sociales et humaines. Il s'agit là d'un nouveau défi, car la sécurisation de l'approvisionnement en matières premières doit aussi prendre en compte les temps caractéristiques longs qui sont imposés par les contraintes liées aux différentes étapes du projet minier : exploration – études de pré faisabilité et de faisabilité – exploitation, et les impacts environnementaux qu'impliquent les exploitations. Une réflexion et une planification sur le long terme (20-30 ans) sont nécessaires pour répondre aux défis des besoins futurs de l'humanité en ressources minérales dans un contexte de développement durable.

En France

Depuis la prospective de l'INSU⁽²⁾ 2008-2013, développée dans l'Alliance Ancre⁽³⁾ et complétée par la stratégie sur les ressources minérales marines profondes à l'horizon 2030, développée et publiée par l'Ifremer en 2011⁽⁴⁾, la recherche française a clairement mis en avant la nécessité d'une recherche coordonnée sur les trois grands axes de la sécurisation de nos besoins en matières premières minérales :

– le développement de l'accès aux ressources primaires à terre et en mer, c'est-à-dire les matières premières extraites du sous-sol ou des fonds marins, les seules à même de supporter la croissance des besoins. Dans ce cadre le BRGM a, par exemple, lancé un projet relatif à la métallogénie du lithium, du niobium et du tantale en Europe (voir encadré E. Gloaguen et J. Melleton ci-contre) ;

(1) Source : Index mundi (cuivre et minerai de fer) et Metal Bulletin (dysprosium).

(2) Site Internet : <http://www.insu.cnrs.fr/terre-solide/prospective-en-sciences-de-la-terre-2008-2013>

(3) Site Internet : <http://www.allianceenergie.fr/>

(4) Téléchargement : <http://www.ifremer.fr/institut/content/download/44025/622908/file/Synth%C3%A8se%20REMIMA%20-%20version%20finale%20-%20BD.pdf>

► LA RECHERCHE DE NOUVELLES RESSOURCES EN LITHIUM, NIOBIUM, TANTALE EN EUROPE

Éric Gloaguen – BRGM, Direction des Géoressources – e.gloaguen@brgm.fr

Jérémy Melleton – BRGM, Direction des Géoressources – j.melleton@brgm.fr

Le développement de nouvelles technologies et des pays émergents exerce une forte pression sur le marché d'un certain nombre d'éléments chimiques. Par exemple, la demande actuelle pour le lithium (Li) est en constante augmentation du fait du développement des batteries Li-ion, particulièrement pour les véhicules électriques ou hybrides ; le tantale (Ta) est très utilisé dans l'industrie électronique, notamment les systèmes de télécommunications et informatiques, et le niobium (Nb) est très utilisé dans l'industrie aéronautique.

Ces trois métaux sont principalement produits à l'échelle mondiale à partir de gisements de types différents. Le lithium provient pour environ 60 % des salars (Amérique du Sud principalement) et pour 40 % des pegmatites, le tantale est issu des pegmatites géantes à éléments rares de la famille Li-Cs-Ta (Australie, Canada, Brésil, Afrique et Chine) et le niobium provient de carbonatites (Brésil, Canada).

Ces types de gisements sont peu communs ou absents en Europe, sauf les pegmatites et granites à éléments rares (PGER à Li-Cs-Ta, Scandinavie et chaîne varisque). Les PGER sont presque toutes exploitées pour l'industrie de la céramique (exemples : Beauvoir, Monts d'Ambazac en France, champs de pegmatites du Portugal, d'Espagne...). La valorisation des sous-produits de ces exploitations (Li, Cs, Ta, Nb, Sn...) pourrait permettre une certaine indépendance de l'Union européenne. De plus, même si ce type de ressource n'est pas aussi rentable que celle des salars, leur exploitation peut être utile du fait de la réactivité de production possible (par exemple, le Li_2CO_3 peut être produit en 24 heures à partir d'une pegmatite contre un an à partir des salars) et des autres éléments valorisables en sous-produits.

Actuellement, des actions de recherche du BRGM sont menées pour définir un nouveau

modèle métallogénique permettant de prédire la localisation de nouveaux gisements. Des premiers résultats géochronologiques ont ainsi permis de souligner la déconnexion des PGER des granites supposés « parents », tout en pointant une relation forte avec le métamorphisme et la déformation de la lithosphère continentale [Melleton *et al.* (2011)]. Des études détaillées et la mise en œuvre d'une approche expérimentale et de modélisation numérique, réalisées dans le cadre du Labex Voltaire d'Orléans, devraient permettre de mettre au point un nouveau modèle de prédictibilité des ressources européennes d'importance stratégique. ■

Bibliographie : Melleton J., Gloaguen E., Frei D., Lima A. (2011) – U-Pb dating of columbite-tantalite from Variscan rare-elements granites and pegmatites. Goldschmidt Conference 2011, Prague.

Texture de croissances unidirectionnelles dans les aplites litées à lépidolite (violet), albite (blanc) et quartz des pegmatites de la famille lithium-césium-tantale à pétalite-lépidolite de Chèdeville, Monts d'Ambazac, Limousin.

Unidirectional growth texture in banded aplitite with lepidolite (violet), albite (white) and quartz from lithium-cesium-tantalum with petalite-lepidolite pegmatites family; Chèdeville, Monts d'Ambazac (Limousin department, France).

© BRGM - E. Gloaguen





Sonde ionique de dernière génération CAMECA IMS 1280 HR2 (High Resolution – High Reproducibility) installée au CRPG (UPR CNRS) à Vandœuvre-lès-Nancy. Cet instrument permet aux chercheurs d'accéder aux compositions isotopiques d'éléments lourds et légers en teneurs très faibles. Les instruments de ce type, ouverts à la communauté scientifique, sont à même de faire fortement progresser les connaissances en métallogénie.

The latest generation CAMECA IMS 1280 HR2 (High Resolution – High Reproducibility) ion microprobe installed in the CRPG (UPR CNRS) research center in Vandoeuvre-lès-Nancy. This instrument allows researchers to measure the isotopic compositions of heavy and light elements at extremely low concentrations. Instruments of this type, made available to the scientific community, are capable of very considerably improving our knowledge of metallogeny.

© CNRS – M. Champenois.

– la valorisation des ressources secondaires, c'est-à-dire celle issue du recyclage des métaux perdus lors des procédés de fabrication (recyclage primaire) ou en fin de vie des produits les contenant (recyclage secondaire). Le recyclage des métaux est essentiel pour assurer la durabilité de cycle de vie des métaux sur le long terme (figure 3) ;

– la prise en compte des questions transverses : possibilités de substitutions, connaissance des flux et des besoins en matières premières, de leurs cycles de vie, connaissance devant en permanence être réévaluée en fonction de l'évolution de la demande et des technologies.

La connaissance et la réduction des impacts environnementaux, leur découplage par rapport à la croissance économique sont sous-jacents à l'ensemble des axes, et sont au cœur de la recherche pour mettre en place une gestion durable des matières premières minérales.

Il reste encore beaucoup d'efforts à faire pour (re)constituer une véritable communauté de recherche. Cette nécessité a été reconnue dans plusieurs rapports parlementaires, de l'Assemblée nationale⁽⁵⁾, du Sénat⁽⁶⁾,

(5) Rapport des députés Ch. Bouillon et M. Havard sur la gestion durable des matières premières minérales. Téléchargement : <http://www.assemblee-nationale.fr/13/rap-info/13880.asp>

(6) Rapport du sénateur J. Blanc sur la sécurité des approvisionnements stratégiques de la France. Téléchargement : <http://www.senat.fr/rap/r10-349/r10-3491.pdf>

Fig. 3 : Le développement des technologies de recyclage des nombreux métaux rares contenus dans l'électronique, comme celle des cartes mères d'ordinateurs ou de téléphones portables, est un enjeu pour la recherche européenne.

Fig. 3: The development of recycling technologies for numerous rare metals contained in the electronics of computer or mobile phones, for example, is an important issue for European research.

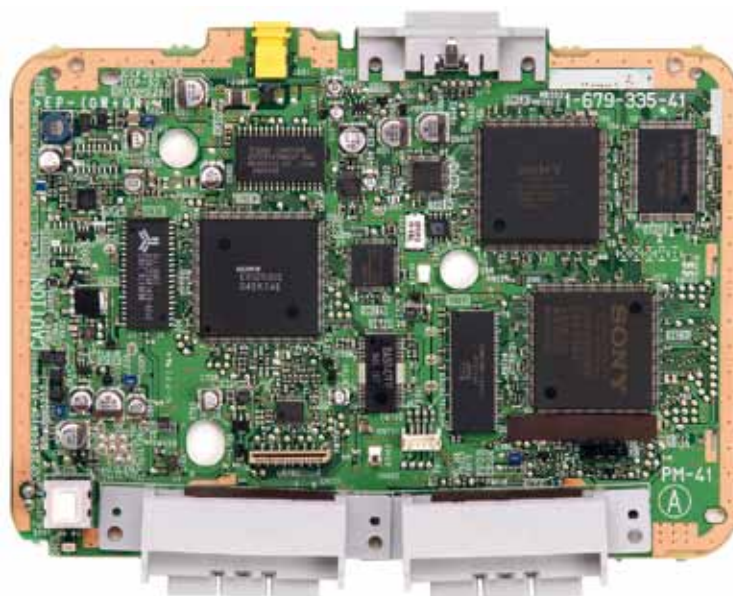
© Evan-Amos, wikimedia.

et de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST, commun aux deux assemblées)⁽⁷⁾. Elle commence à être également soutenue par des actions concrètes :

– le programme « Connaissance et technologie du sous-sol pour son exploitation et usage durable » (CESSUR) de l'INSU, qui avait aussi pour cible la connaissance de la production naturelle d'hydrogène en partenariat avec l'Ifremer ;

– la mise en place d'un observatoire de la mine en milieu fragile, dans un partenariat du CNRS avec le ministère des Ressources naturelles et de la Faune du Québec, dédié à une recherche multidisciplinaire concernant

(7) Rapport des députés Christian Birraux et Christian Kert sur la séance consacrée aux enjeux des métaux stratégiques : le cas des terres rares. Téléchargement : <http://www.senat.fr/rap/r10-782/r10-7821.pdf>



l'impact du développement minier sur le milieu et les habitants des territoires arctiques du Québec, dans le cadre du changement climatique ;

– l'école thématique « Ressources minérales » du CNRS, dont trois éditions annuelles successives ont permis de réunir la communauté francophone des étudiants et des chercheurs⁽⁸⁾ (voir encadré B. Goffé, A. Cheilletz, D. Goetz ci-contre) ;

– la création de laboratoires d'excellence (Labex) dans le cadre du programme « Investissements d'avenir » de l'Agence nationale de la recherche⁽⁹⁾, traitant en tout ou pour partie des ressources minérales : Ressources21 à Nancy, Voltaire à Orléans, Sérénade à Aix-Marseille, Matisse à Paris, Mer à Brest ;

– la mise en place d'équipements dédiés comme Planex⁽¹⁰⁾ pour la caractérisation chimique et structurale de matériaux de composition complexe dans des environnements sévères (haute pression et haute température) à Orléans ou RESIF⁽¹¹⁾ pour l'observation sismique et géodésique du sous-sol sur l'ensemble du territoire métropolitain ;

– la participation active des équipes BRGM – souvent en position de coordination – à la plupart des programmes de recherche de l'Union européenne (7^e PCRD) dans le domaine des ressources minérales (voir ci-après) ;

– l'appel à manifestations d'intérêt de l'Ademe dans le cadre des « Investissements d'avenir » sur la collecte, le tri, le recyclage et la valorisation des déchets.

Cette dynamique devrait se poursuivre, notamment en aval des travaux engagés par l'État dans le cadre du Comité pour les métaux stratégiques (voir introduction scientifique ce numéro).

La France entretient des relations de coopération scientifique avec les pays francophones, notamment le Québec (voir encadré M. Jébrak, p. 88), le Maroc et d'autres pays d'Afrique.

(8) Site Internet de la troisième édition (2012) de l'École de métallogénie : <http://www.geosciences.mines-paristech.fr/fr/accueil/actualites/ressources-minerales-la-vision-du-mineur>

(9) Site Internet : <http://investissement-avenir.gouvernement.fr/content/laboratoires-d%E2%80%99excellence>

(10) Présentation : http://www.univ-orleans.fr/osuc/pdf/Equipex_Projet_Planex.pdf

(11) Présentation : <http://www.resiffr/actu.php?id=9>

► 3^e ÉDITION DE L'ÉCOLE THÉMATIQUE DU CNRS SUR LES RESSOURCES MINÉRALES

Bruno Goffé – Directeur de recherche au Centre national de la recherche scientifique (CNRS/INSU) – bruno.goffe@cnrs-dir.fr

Alain Cheilletz – CNRS/INSU – Chargé de mission Sciences de la Terre – alain.cheilletz@cnrs-dir.fr

Damien Goetz – Mines ParisTech – Directeur du Centre de Géosciences – Enseignant Chercheur – damien.goetz@mines-paristech.fr



Depuis 4 ans, l'Institut national des sciences de l'Univers du CNRS s'est résolument engagé à soutenir et développer la recherche sur les ressources minérales et les métaux stratégiques. Porteur du grand réseau européen de recherche Era-Min, le CNRS, soucieux de s'appuyer au niveau national sur une communauté de jeunes chercheurs et ingénieurs,

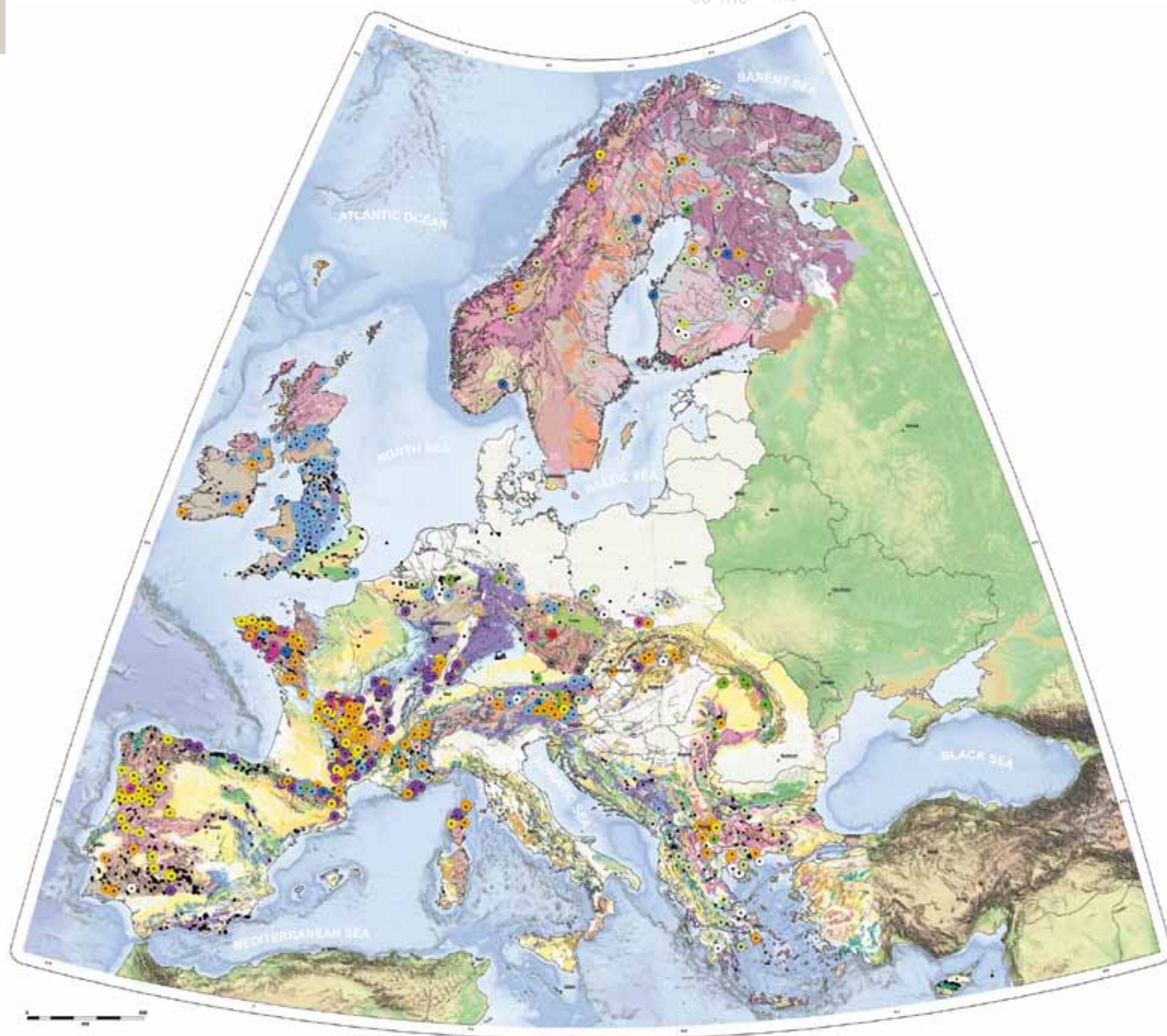
a organisé en 2012, en collaboration avec l'École des Mines de Paris, la 3^e édition de son École thématique sur les ressources minérales, intitulée cette année « La vision du mineur ».

Cette école a connu un succès remarquable, rassemblant pendant trois jours sur le site historique de Mines ParisTech à Paris quelque 310 participants dont une bonne moitié d'étudiants, et de jeunes ingénieurs et chercheurs venant de l'industrie, des EPIC, du CNRS et des universités de Beauvais, Besançon, Chambéry, Grenoble, Lille, Nancy, Orléans, Rennes, Toulouse. L'augmentation du nombre de participants par rapport aux éditions précédentes organisées à Orléans et Nancy, montre l'intérêt croissant de la question de la sécurisation de l'accès aux ressources minérales chez les jeunes et son renouveau chez les seniors.

Avec 35 orateurs invités de renom venant des universités du Québec et de France, de l'industrie productrice de matières premières mais aussi utilisatrice, des organismes de recherche, des ministères et des ONG, l'École a principalement présenté les questions de la production des ressources minérales.

Ouverte par une présentation magistrale de Michel Gauthier, professeur à l'Université du Québec à Montréal, sur l'histoire de la conquête des ressources minérales dans le Nouveau Monde et des relations avec les politiques française et britannique de l'époque, l'École s'est articulée autour des questions des enjeux économiques des matières premières, de la structuration institutionnelle et du lien entre formation, recherche et industrie, de l'avenir de l'industrie des ressources minérales en Europe, de la modélisation et de l'évaluation des gisements, et des techniques d'exploitation des mines et de traitement des minerais.

Outre la nécessaire prise en compte de l'approvisionnement en métaux pour le développement de notre économie et de l'accès aux nouvelles énergies, l'École a montré à nos jeunes chercheurs et ingénieurs l'impérieuse nécessité de concevoir l'accès aux ressources minières dans le cadre du développement durable, ce qui implique le respect et la prise en compte des intérêts des habitants des régions concernées comme nous l'a expliqué Robert Marquis, sous-ministre au ministère des Ressources naturelles et de la Faune (MRNF) du Québec, en charge du développement minier dans le cadre du plan Nord du Québec. ■



- | | |
|-------------|---------------------------------------|
| ● Antimoine | ● Indium |
| ● Béryllium | ● Magnésium |
| ● Cobalt | ● Niobium |
| ● Fluorine | ● Éléments du groupe du platine (PGE) |
| ● Gallium | ● Terres rares |
| ● Germanium | ● Tantale |
| ● Graphite | ● Tungstène |

▲ Fig. 4 : Version simplifiée de la carte réalisée dans le cadre du projet ProMine-WP1 représentant occurrences et gisements européens pour les 14 substances « critiques » identifiées par l'initiative « matières premières » de la Commission européenne.

Fig. 4: Simplified map prepared in the framework of the ProMine project showing European occurrences and deposits of the 14 "critical" mineral raw materials identified by the "Raw materials" initiative of the European commission.

© <http://promine.gtk.fi>

Dans le cadre de l'Union européenne

La recherche joue un rôle important en appui à l'initiative matières premières lancée par la Commission européenne en 2008 [COM(2008) 699]. Cette attention politique nouvelle, portée aux problématiques liées à l'approvisionnement en matières premières minérales de l'UE, se traduit notamment par un important effort de recherche, soutenu notamment par le 7^e PCRD, en cours de mise en œuvre (2007-2013).

Elle se traduit également par le lancement, en novembre 2011, du réseau européen Era-Net, appelé Era-Min, dont l'objectif est de coordonner la programmation de la recherche scientifique par les agences nationales ou régionales de programmation dans le domaine des matières premières d'origine minérale, non énergétiques, voire, à terme, de lancer des appels communs à propositions. Era-Min, coordonné, par le CNRS², rassemble actuellement neuf pays européens.

De nombreux projets de recherche, représentant un budget cumulé de l'ordre de 100 M€, résultent déjà de cette nouvelle priorité des politiques européennes :

– AEGOS Phase 1 : action de coordination pour le développement d'un système d'information géoscientifique panafricain.

Coordinateur : BRGM.

<http://www.aegos-project.org/index.php>

– EO-MINERS : développement et application de la technologie hyperspectrale spatiale pour l'observation des impacts environnementaux et sociétaux de l'exploration et de l'exploitation minières.

Coordinateur : BRGM.

<http://www.eo-miners.eu/>

– EUGEORESOURCE : système d'information partagé plurilingue, commun à plusieurs pays de l'Union européenne.

Coordinateur : TNO (Pays-Bas).

<http://www.eurogeosource.eu>

– EXPERL : pour l'exploitation efficiente des ressources européennes en perlite et le développement de produits, à base de micro-perlite, à haute valeur ajoutée pour les industries chimiques, de la construction et production manufacturière.

<http://www.experl.eu>

– I2MINE : développement de technologies intelligentes pour la mine profonde du futur (voir encadré Horst Hejny p. 39, ce numéro)

Coordinateur : MIRO (Royaume-Uni).

<http://www.i2mine.eu/>

– ONEGEOLOGY EUROPE : permet l'accès multilingue aux métadonnées et aux données géologiques numériques publiques européennes, harmonisées au niveau schématique, à une résolution au 1/1 000 000. Le BRGM y occupe une place centrale.

<http://www.onegeology-europe.eu>

– POLINARES : action de coordination relative aux politiques applicables aux ressources naturelles. Coordination : Centre for Petroleum Law and Mineral Policies, Dundee (Royaume-Uni).

<http://www.polinares.eu/>

– ProMine : développement de la première représentation numérique harmonisée paneuropéenne relative aux gîtes minéraux européens et aux premières modélisations numériques 3D de quatre grands métallotectes. La figure 4 est un exemple de la représentation des occurrences et gisements européens de métaux rares (voir aussi article P. Nurmi p. 36, et encadré ProMine p. 21). Ce projet vise également à développer de nouvelles technologies de production, notamment de nanoproduits (figure 5, étape de la production de rhénium sphérique).

Coordinateur : GTK (Service géologique de la Finlande), avec participation active du BRGM.

<http://promine.gtk.fi/>



Fig. 5 : Production de perrenates de cobalt, fer et nickel par échange d'ions et méthode d'extraction par solvants.

Source : ECOREN et projet européen ProMine (7^e PCRD).

Fig. 5: Production of cobalt, iron and nickel perrenates by ion exchange and the solvent extraction method.

Source : ECOREN and the EU ProMine Project (FP7).

– RAMINTECH (projet de la DG Entreprises) : état des lieux européen (acteurs, projets) de l'innovation dans le domaine des ressources minérales, identification de projets pilote en vue de l'Horizon 2020 (8^e PCRD) –

Coordinateur : TNO (Pays-Bas).

– SARMA : gestion des granulats et politique d'aménagement du territoire.

Coordinateur : GeoZS (Service géologique de la Slovénie).

<http://www.sarmaproject.eu/>

“
La recherche
joue un rôle
important
en appui
à l'initiative
matières premières
lancée par
la Commission
européenne
en 2008.
”

► LA RECHERCHE EN MÉTALLOGÉNIE

Michel Jébrak – Professeur, Département des sciences de la Terre et de l'atmosphère – Titulaire de la Chaire en entrepreneuriat minier UQAT-UQAM – Université du Québec à Montréal (UQAM) – jebrak.michel@uqam.ca

La recherche métallogénique se développe depuis le début du XX^e siècle autour de la description des gisements (modélisation gîtologique) et de la compréhension des processus de concentration. Depuis quelques années, alors que les travaux se redéploient autour de centres de recherches plus structurés, notamment en Australie et au Canada, plusieurs nouveaux modèles d'exploration ont été précisés, en particulier ceux en relation avec la croûte profonde et le magmatisme. La découverte du gisement d'or de Challenger au sud de l'Australie et les découvertes de minéralisations en uranium migmatitique dans les socles protérozoïques ont montré que des gisements économiques pouvaient être engendrés par fusion partielle quasiment *in situ*. On s'est aussi rendu compte que certains métaux (tellure, bismuth...) pouvaient fondre à basse température et collecter l'or dans leurs gouttelettes fondues. On sait aujourd'hui que des

gisements énigmatiques, tels que ceux d'Hemlo (or, Canada), de Broken Hill (plomb, Australie) ou de Balmat (plomb, États-Unis) ont connu une phase de fusion partielle, ce qui explique leur association minérale et leur structure.

La compréhension des systèmes porphyriques a également fait un bond en avant du fait des nombreuses études, tant dans les anciennes provinces de la Cordillère américaine que dans celles de la paléoTéthys. Il apparaît désormais tout un ensemble de contextes plutoniques favorables aux gisements. De même, la découverte des capacités de transport des métaux par les gaz volcaniques réactive la vieille notion de gisement pneumatolithique et souligne le rôle du soufre, du chlore et du fluor dans ces mécanismes.

Les progrès de la géophysique et l'analyse des enclaves d'origine profonde permettent aujourd'hui de cartographier le manteau sous-lithosphérique, *Terra Incognita* de la

métallogénie. C'est là où se trouvent probablement les sources de plusieurs métaux d'affinité mafique (Ni, Cu, Au...) dont les mécanismes de mise en place et les contrôles géodynamiques ont été considérablement éclaircis.

Enfin, les processus magmatiques hydrothermaux ont également fait l'objet d'avancées importantes, notamment grâce à l'analyse géochimique complète des fluides dans les inclusions, y compris de leur contenu en métaux, et la capacité d'analyser les éléments traces *in situ*. Les minéraux hydrothermaux néoformés présentent des caractéristiques géochimiques qui permettent de les utiliser comme traceurs fins des conditions de genèse et comme outils de prospection minéralogique.

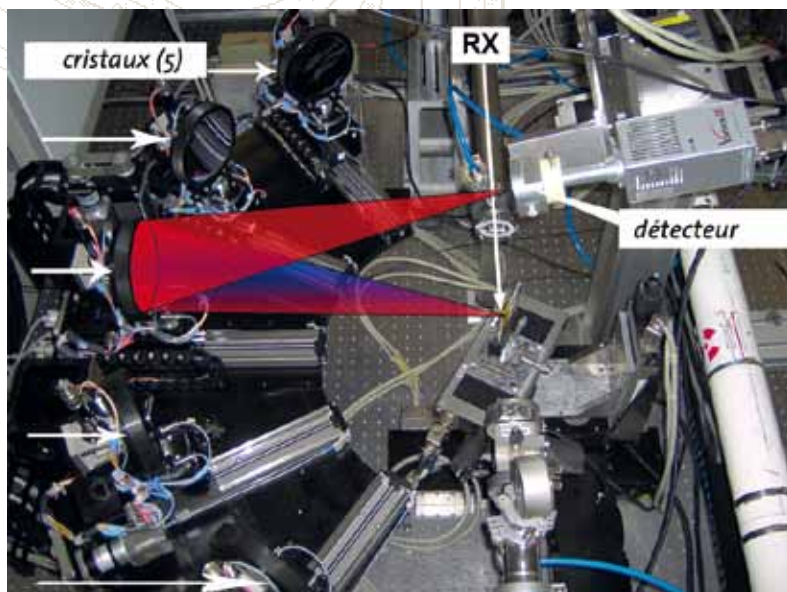
Si le XX^e siècle a permis d'élucider bon nombre des mécanismes de transport et de dépôt, il reste pour le XXI^e siècle à découvrir où sont les sources des gisements métalliques. ■

**Cheminée de soufre natif
à White Island, Nouvelle-Zélande.
Ce volcan sert de modèle naturel
pour la formation des gisements
épithermaux à or et argent.**

*Native sulfur chimney on
White Island, New Zealand.
This volcano is used as a natural
analogue for epithermal gold
and silver deposits.*

© M. Jébrak.





Cette dynamique, qui soutient l'intensification des collaborations entre centres de recherche, services géologiques, universités et acteurs économiques européens, devrait encore croître avec la mise en place du futur PCRD (2014-2020) « Horizon 2020 » (voir encadré FarHorizon, p. 95), les matières premières minérales figurant parmi les priorités thématiques de la proposition soumise au Conseil européen et publiée le 30 novembre 2011 [COM(2011) 811]. Elle comprend notamment le lancement d'un partenariat européen pour l'innovation (PEI) « matières premières minérales », les PEI étant destinés à fédérer l'effort de recherche européen, des États membres et des acteurs économiques dans un nombre limité de domaines prioritaires. En parallèle, la Commission européenne propose également la création, en 2014, d'une Communauté de la connaissance et de l'innovation dans ce même domaine [COM(2011) 822]. Tous les éléments se mettent ainsi progressivement en place pour développer les synergies et les interactions entre acteurs européens des ressources minérales, et entre ceux-ci et le reste du monde, notamment les pays en développement.

Ainsi, après des années de négligence, en France et en Europe, dans le domaine de la recherche concernant les ressources minérales, une nouvelle dynamique est en train de voir le jour, à l'instigation de la Commission européenne. Parmi les institutions publiques françaises impliquées, l'INSU s'est engagée dans une action de stimulation des laboratoires universitaires, tandis que le BRGM – également impliqué dans ces recherches amont – développe de nouvelles initiatives en lien avec ses partenaires des services géologiques. ■



Spectromètre d'absorption X à haute résolution installé sur la ligne nationale FAME du CNRS à l'ESRF (Grenoble).
Cet instrument est particulièrement bien adapté à la métallogénie. Il permet la détermination de la forme chimique des espèces géochimiques et l'analyse d'éléments ultra dilués (1 ppm) dans les minéraux et les fluides sous les conditions expérimentales de haute température et pression.

High resolution X-ray absorption spectrometer installed on the French beam line FAME at ESRF (Grenoble). This instrument is particularly well adapted to metallogeny research. It allows to determine the chemical form of geochemical species, to analyse extremely diluted elements (1 ppm) and to carry out in-situ experiments at hydrothermal ore processing conditions.

© CNRS – J.-L. Hazemann..



Structuring research for developing the sustainable use of mineral resources

Since the collapse of the former USSR thirty years ago, the world has undergone sweeping changes. Its population has grown by about 2.5 billion, while the percentage of those living in extreme poverty (with less than \$ 1.5/day, according to the World Bank definition) decreased from about 45% to less than 20%. These trends, including the rapid economic development of highly populated, raw- materials intensive countries such as China or Brazil and the pace of innovation in such industries as aerospace, renewable energies and energy saving, automobile, defence and even healthcare sectors are creating an unprecedented demand for non-energy mineral raw materials, some of these being produced in quantities of less than 100,000 tons/year, the so-called "rare metals".

Minerals are non-renewable resources. Their production and transformation into consumer goods require large amounts of energy, water and, in many cases, of chemicals, some being toxic. Emissions into air, soil and/or water may occur, as well as the generation of large amounts of waste. The latter can contain heavy metals and/or residual chemicals harmful to the environment and/or human health. In this context, research is of paramount importance to develop data bases and knowledge in support of policy-making, decision-making and innovation needed to discover and extract tomorrow's resources - that will mostly be located in deep-seated, non-outcropping mineral deposits. Every endeavour will need to be made, notably to use available resources more wisely, to consume less energy and water, to generate less waste and emissions, to base policies and industry decisions on life-cycle analysis data enabling a comparison of the different processes available for producing a same metal, to design products that will deliver better services but use less raw materials or re-use components from older, dismantled goods and to recycle metals and minerals contained in end-of-life products. This paper provides an overview of dedicated French and European Research in progress in these fields.