



Les filières industrielles de Haute Technologie dépendent étroitement d'une large palette de métaux stratégiques : NTIC (Ta, Ge, In, Ga), superalliages (Re, Sc, Ta, Co), catalyse (Pt, Pd, Ru). Le BRGM, par son expérience et sa position de Service Géologique, a pour ambition de **fédérer la Recherche et le Développement autour de ces métaux** en considérant l'ensemble de leur cycle " du gisement au marché ".

Cette vocation intégratrice autour des métaux de l'avenir découle des compétences multidisciplinaires du BRGM, depuis la métallogénie, la minéralurgie et l'économie minérale, jusqu'aux aspects sociaux et environnementaux du développement durable.

Métallogénie

- ▣ Synthèses métallogéniques multi-échelles (du continent au gisement) : S.I.G. et cartes de prédictivité minière.
- ▣ Compréhension des processus de formation des gisements.
- ▣ Modélisation géologique des gisements non conventionnels en tant que nouvelles sources d'approvisionnement.
- ▣ Identification de nouveaux gisements associés aux résidus de traitements métallurgiques.
- ▣ Caractérisation minérale des minerais et spéciation ; identification de métaux valorisables.

➤ **Moyens analytiques de pointe au service de la métallogénie : analyses chimiques infra-traces, analyses chimiques in situ, isotopie, inclusions fluides, etc.**

Minéralurgie

- ▣ Expertise en procédés physiques de valorisation (broyage, gravimétrie classique et centrifuge, flottation, magnétisme) et R&D liée aux procédés de valorisation chimiques (hydrométallurgie, SX-EW).
- ▣ Expertise en biolixiviation des minerais et biotraitement des résidus solides (déchets métallurgiques, tailings, etc).
- ▣ Développement de logiciels de simulations de procédés (USIM-PAC), bilan matière (BILCO) et procédures d'échantillonnage (ECHANT).

➤ **Moyens : laboratoires (450 m²) et usine pilote (2 000 m²) pour broyage, flottation, biotechnologies, hydrométallurgie.**

Economie minérale

- ▣ Modélisations des comportements des marchés et prospective ; scénarii offre / demande.
- ▣ Cycles des métaux : dynamique des cycles, analyse des points de rupture. étude de risques par filière, impacts des innovations technologiques.

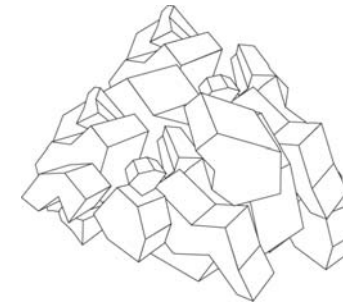
➤ **Analyses prospectives, anticipation des crises.**

Contact
metaux.hightech@brgm.fr

Y. Deschamps y.deschamps@brgm.fr

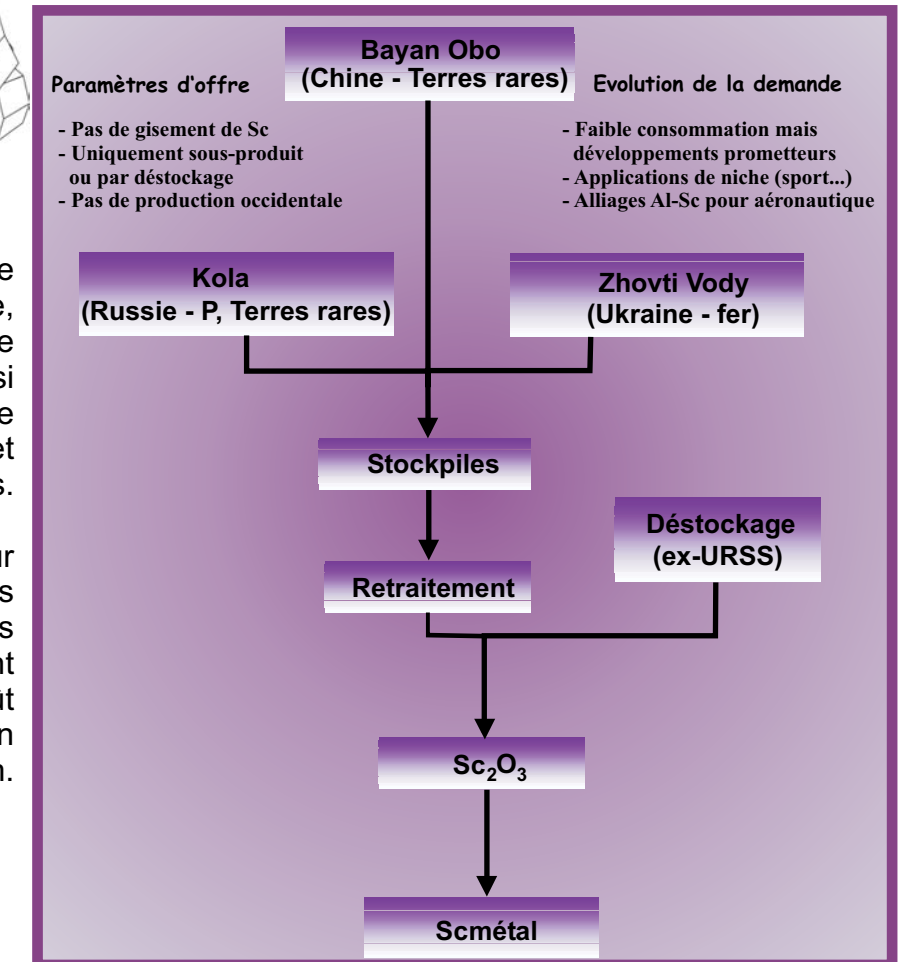
BRGM
 3, avenue Claude Guillemin
 BP 6009
 45060 Orléans Cedex 2, France

+33 (0)2 38 64 34 34



La consommation actuelle de scandium (**Sc**) est encore infime, mais la demande pourrait croître fortement à moyen terme si l'industrie aéronautique s'empare des alliages Al - Sc, qui font l'objet de recherches intensives.

Une R&D focalisée sur l'identification de nouvelles ressources et de procédés d'extraction-purification assurant une offre régulière à faible coût fournirait la clef pour une utilisation massive du scandium.



Les enjeux du scandium dans la filière superalliages

DEMANDE

Des utilisations de " niche "

- Le scandium (Sc), allié à l'aluminium, lui confère des propriétés mécaniques se rapprochant de celles du titane, mais pour un prix deux fois moindre.
- Ce " titane du pauvre " est actuellement surtout utilisé pour des applications de "niche" : équipements sportifs haut de gamme, fil à souder (alliages Al), nouvelles lampes halogènes de haute intensité, lasers, standards analytiques.
- Les alliages Al-Sc ont été développés en URSS pour des applications aéronautiques (avion MIG). Les alliages Al-Sc et Mg-Sc suscitent un vif regain d'intérêt dans le secteur aéronautique, avec le développement de nouveaux alliages complexes, binaires ou ternaires Al-Mg-Sc (avec Zr, Ti, Mn, Il, Terres Rares), par exemple chez Daimler Benz Aerospace, Pratt & Whitney, British Aerospace, etc.
- A l'avenir, le Sc pourrait entrer dans la composition des réservoirs à hydrogène des véhicules à pile à combustible.

Une consommation infime, mais une R&D prometteuse pour la filière aéronautique

- La consommation mondiale de Sc est encore infime, de l'ordre de 2 t équivalent Sc₂O₃ par an.
- La demande future pourrait croître fortement à moyen terme si l'industrie aéronautique s'empare des nouveaux alliages Al-Sc en cours d'étude. Ceci aurait un impact radical sur le besoin d'identification de nouvelles ressources et de nouveaux procédés d'extraction-purification.

Des prix très élevés et très variables

- La commercialisation se fait directement par les producteurs ou par l'intermédiaire de quelques traders spécialisés.
- Les prix de l'oxyde Sc₂O₃, très élevés, varient fortement entre 700 et 3500 USD/kg, selon le degré de pureté et les quantités négociées.

OFFRE

Un marché confidentiel

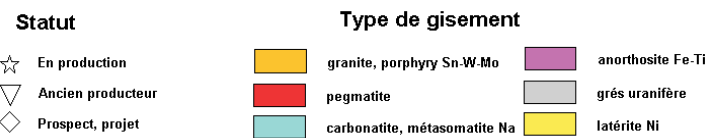
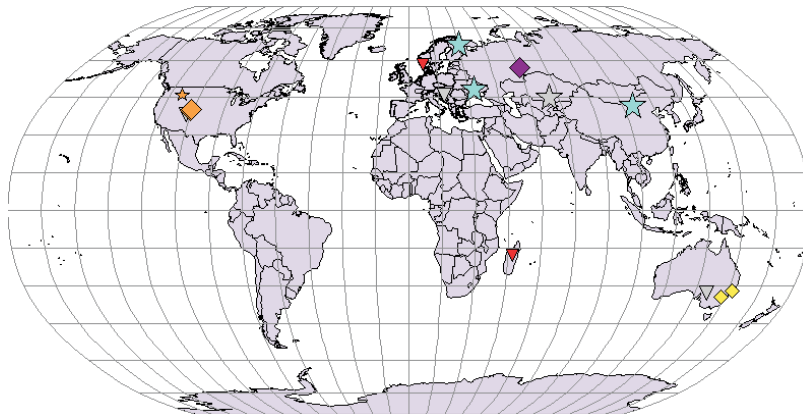
- La production mondiale de scandium (sous forme d'oxyde Sc₂O₃) n'excède pas 2 t par an. C'est l'élément produit en plus faible quantité parmi tous les métaux.
- La production primaire est de l'ordre de 400 kg. Le reste de l'offre est assuré par déstockage (Russie).
- La production de Sc métal est infime, inférieure à 10 kg/an. La totalité du marché concerne l'oxyde Sc₂O₃.

Une absence d'offre occidentale

- Il n'y a aucune production occidentale de scandium. La production actuelle provient majoritairement de Chine, d'Ukraine et de Russie (voir carte) : un centre est lié aux terres rares chinoises de Bayan Obo, un autre aux "stockpiles" de la mine de fer aujourd'hui arrêtée de Zhovti Vody en Ukraine, et un troisième à l'apatite de Kola en Russie. Des capacités existaient également au Kazakhstan et en Russie.
- Plusieurs gisements potentiels sont identifiés, en particulier anthropiques, avec des teneurs moyennes de 50 à 300 g/t Sc, mais aucun projet d'exploitation n'est encore annoncé.

Des ressources potentielles dispersées dans de nombreux gîtes

- Le scandium est trop dispersé dans la nature pour former à lui seul des gisements naturels exploitables. Il est donc récupéré uniquement en sous-produit d'autres substances (U, Fe, REE, W, etc).
- Sc est un sous-produit potentiel de gîtes de typologies très diversifiées (voir tableau typologie géologique), qui sont primaires (magmatiques, hydrothermaux, sédimentaires), et/ou supergènes (latéritiques, alluvionnaires) ou anthropiques (rejets miniers et métallurgiques).



Répartition des gisements de scandium (BRGM, 2003)

Axes R&D en économie proposés par le BRGM

- Impact de nouvelles utilisations massives de Sc (industrie aéronautique, aérospatiale) sur l'offre et la demande à moyen terme (étude prospective).

TYPOLOGIE GEOLOGIQUE DE LA RESSOURCE

Sc dissimulé dans de nombreux porteurs

- Sc est le plus souvent " camouflé " dans le réseau cristallin de nombreux minéraux de REE-Y, Ti, P, U, Nb-Ta, Sn-W, Mo, etc.
- Ses expressions minéralogiques sont rares. La radioactivité de la thortveitite (Sc,Y)₂Si₂O₇, minéral principal de Sc, est une contrainte environnementale lourde.

Des gisements résultant de processus de concentration successifs

- Les minerais de Sc résultent de processus concentrateurs, remobilisant le plus souvent des préconcentrations (pyroxénites, phosphorites, minerais Fe).
- Ces processus peuvent être endogènes (e.g. fractionnement magmatique; hydrothermalisme tardimagmatique) supergènes (latérites, bauxites) et/ou d'origine anthropique (résidus miniers ou métallurgiques).

La minéralogie conditionne étroitement la viabilité des futurs projets

- L'économie des projets Sc dépend de la nature des phases minéralogiques porteuses et des implications sur les procédés métallurgiques d'extraction du métal. Selon le mode de répartition de Sc dans le gîte (uniforme ou porteurs spécifiques), deux paramètres sont déterminants :

- La teneur moyenne du " minéral ", lorsque Sc est réparti uniformément (boues rouges du traitement des bauxites, latérites Ni, phosphates, etc.). Si Sc est adsorbé sur les argiles, l'extraction par lixiviation acide ne donne que des taux de récupérations très faibles ; une mise en solution totale générerait des coûts de production prohibitifs.

- La teneur du minéral scandifère (minéral de Sc exprimé ou porteur principal) et son abondance dans le gîte (pegmatites à thortveitite, tailings de porphyry Mo à rutile scandifère) : dans ce cas, on peut envisager d'obtenir un préconcentré par simple processus physique : gravimétrie, séparation magnétique, etc. (e.g. rutile scandifère des tailings du porphyre W de Climax).

Typologie géologique	Plutonisme granitique			Plutonisme alcalin - peralcalin		Plutonisme basique - ultrabasique		Sédiments			
	Pegmatite potassique	Granite "spécialisé", porphyry	Pérogénitique	Carbonatite	Métasomatisme Na (Olympic Dam)	Anorthosite, gabbro	Ultrabasite, pyroxénite	Grès et conglomérat	Phosphorite fossile et océanique	Formation ferrifère	Charbon, bitume, pétrole
Éléments associés	à Ta, REE, W, Sn	à Sn, W, Nb-Ta, Mo	à W, U, CaF ₂	à Nb, REE, Zr, P	à Fe, V, U, REE (Y)	à Fe, Ti, V, P	à Fe, Mg, Al	à U, V	à P, REE, U, Ga	à Fe, P	à V, Mo, Nb, Ni, Cr
Production	Ancienne	Projets	Projets	Actuelle	Actuelle	Projets	-	Actuelle	Ancienne	-	-
Economie	Nombreux petits gisements	Sc éventuel en ss-produit	Sc éventuel en ss-produit	Sc en ss-produit	Sc en ss-produit	Sc éventuel en ss-produit	Pas de gisement	Sc en ss-produit	Sc éventuel en ss-produit	Sc éventuel en ss-produit	Sc éventuel en ss-produit
Porteurs Sc	Thortveitite, Sc ixioilite, Sc columbontalite	Wolframite, cassitérite, rutile Ta-Nb	Davidite, wolframite, thortveitite	Monazite, rhabdophane, Sc columbite	Oxydes Fe ? Cr V davidite	Ti-magnétite V-Sc ; ilménite	Silicates Fe-Mg : pyroxène, amphibole	Vanadates U, davidite, brannérite	Prétilite, fluorapatite	Prétilite, zircon Sc	Sorption sur matière organique
Teneur porteur principal	3 - 18 % Sc (conc.)	0,1 - 0,4 % Sc	nd	0,5 - 1 % Sc	nd	70 - 1500 ppm Sc	100 - 200 ppm Sc	200 - 500 ppm Sc	nd	nd	nd
Radio-activité	Elevée	Variable	Variable	Elevée	Elevée	Faible	Variable	Elevée	Variable	Faible	Faible
PRECONCENTRATION PRIMAIRE											
Processus de préconcent.	Environnement basique ?	Magmatique	Magmatique ?	Magmatique		Magmatique		Sédimentaire s.l., exhalatif-sédimentaire, circulations de bassin			
Teneur moyenne Sc		10 - 200 ppm		15 - 70 ppm	50 - 200 ppm	20 - 30 ppm	40 - 120 ppm	< 10 ppm	0,1 - 60 ppm	5 - 65 ppm	5 - 30 ppm
CONCENTRATION ENDOGENE ET/OU SUPERGENE											
Processus de concentration Gîtes de référence	Magmatique Iveland (Norvège)	-	Hydrothermal	Hydrothermal basse T°, supergène Kovdor (Kola, Russie) ; Fen (Norvège)	Métasomatisme Na - carbonates Bayan Obo (Chine) ; Zhovti Vody (Ukraine)	Supergène résiduel : Latérites Ni sur UB, trait difficile : Syerston, Lake Innes (Australie). Bauxites Chine, Jamaïque, Oural		-	Supergène : croûtes phosphates Al Fairfield (USA)	Hydrothermal Saint-Aubin (France), Harz (Allemagne)	-
Teneur minéral	x 100 ppm ?		nd			< 50 ppm			1000 ppm	40 - 1000 ppm	
CONCENTRATION ANTHROPIQUE											
Source Sc Gîtes de référence	Granites spécialisés et porphyry : scories W, Sn, Ta tailings à rutile Sc : Climax, Henderson (USA)		Tailings à fluorine - thortveitite Crystal Mountain (USA)			Concentrés Ti-magnétite Kachnakar (Russie)	Bauxites : boues rouges Bayer procédé Bayer	Tailings résidus hydrométallurgie U : Beshkak (Kazakhstan) ; Colorado (USA)	Production H ₃ PO ₄ par voie humide		Cendres (fly ash) : West Virginia, Dakota (USA); Athabasca (CAN), etc.
Teneur moyenne Sc	100 - 900 ppm à 1000 - 2300 ppm (Climax)		nd			nd	jusqu'à 300 ppm	460 - 1800 ppm	5 ppm dans H ₃ PO ₄		5 - 1000 ppm (cendre)

Typologie géologique des gisements de scandium (BRGM, 2003)

Axes R&D en métallogénie - minéralogie proposés par le BRGM

- Caractérisation de nouvelles ressources (gros gisements potentiels à production régulière et coûts de production bas) : gisements primaires ou supergènes, produits de transformation associés. Recherche de concentrations à faible radioactivité.
- Minéralogie des phases porteuses de scandium (spéciation des minerais), partition de Sc.
- Nouveaux procédés métallurgiques d'extraction-purification, minerais réfractaires : valorisation de Sc en sous-produit, abaissement des seuils d'exploitabilité. Implications environnementales.