



LES RESSOURCES MINIÈRES DANS LE CONTEXTE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE – EXEMPLE DU CUIVRE ET DES TERRES RARES



Jérémie Melleton
(direction des Géoressources)
j.melleton@brgm.fr



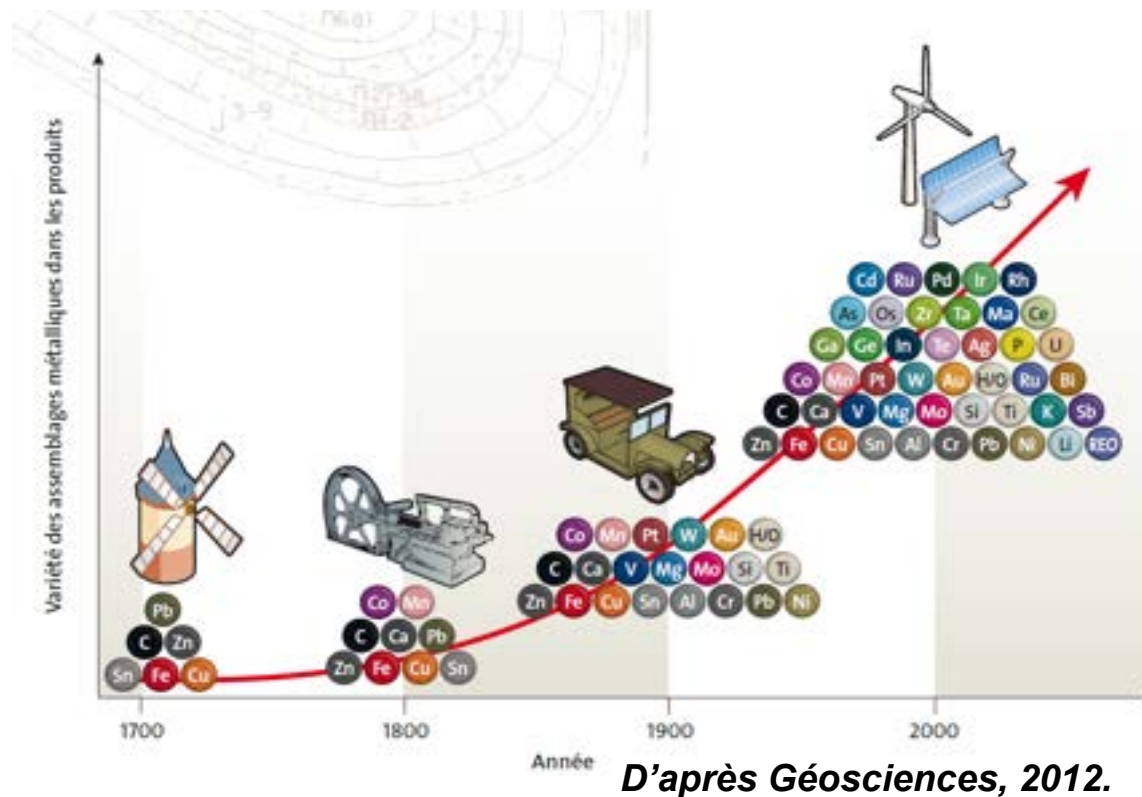
Géosciences pour une Terre durable

brgm

Ressources minérales dans le contexte de la transition énergétique ?

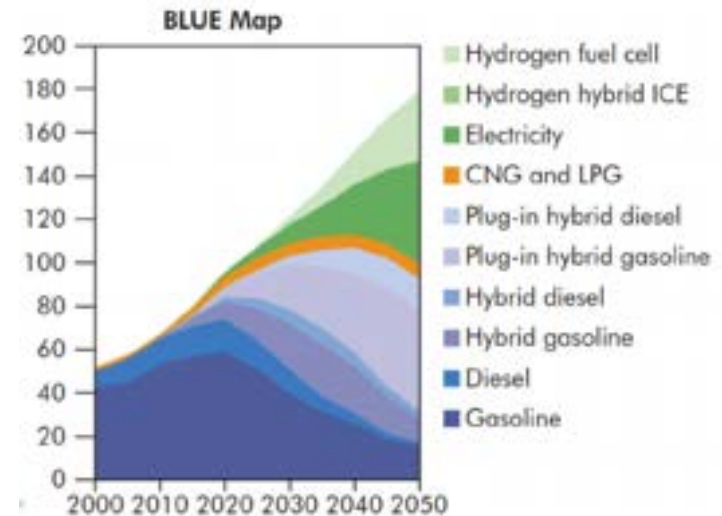
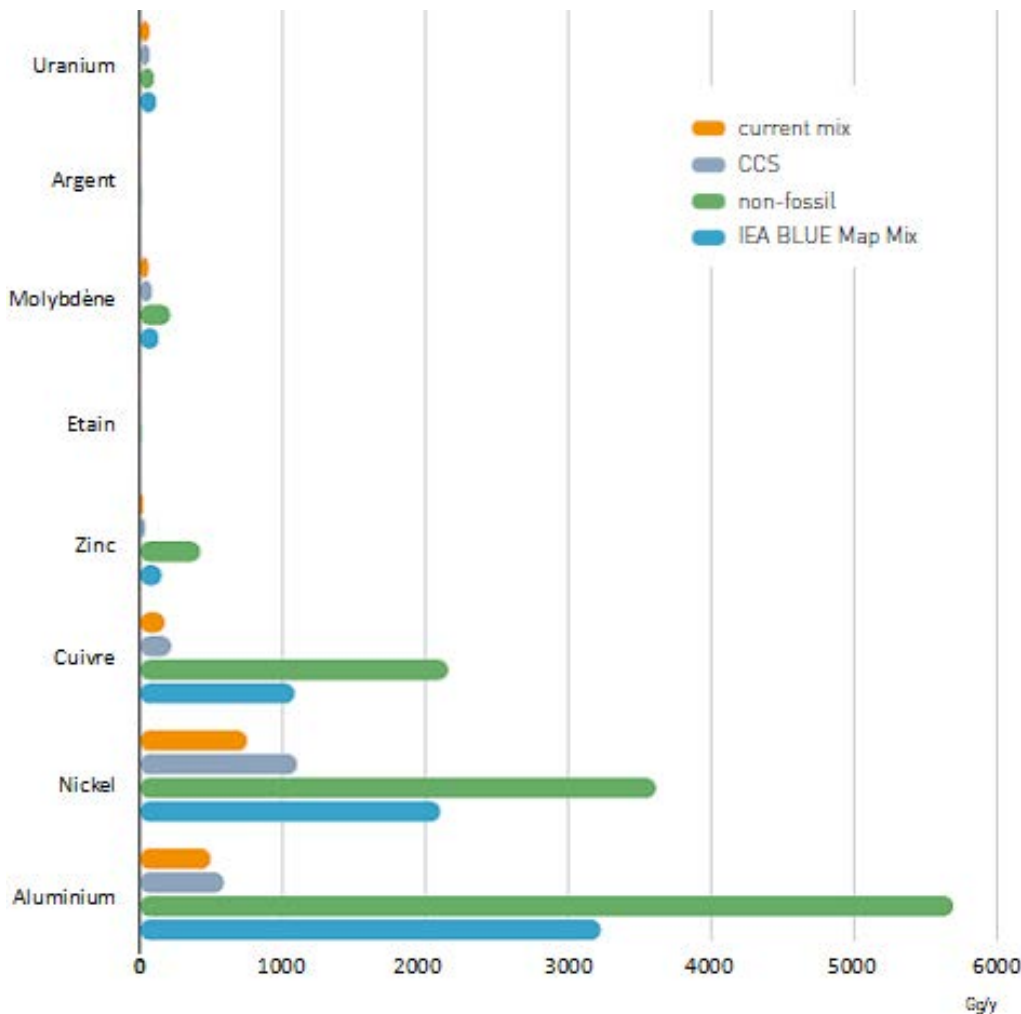
Explosion de l'utilisation des métaux depuis le début de l'ère industrielle

Développements de nouvelles technologies étendent le spectre des métaux utilisés.



Ressources minérales dans le contexte de la transition énergétique ?

Transition énergétique = fort impact pour certains métaux



International Energy Agency (2010)

Besoins en métaux en fonction de différents mix électriques pour fournir la production mondiale d'électricité de 2007 (1.8.1012 kWh) (Kleijn et al., 2011) – UNEP, 2013

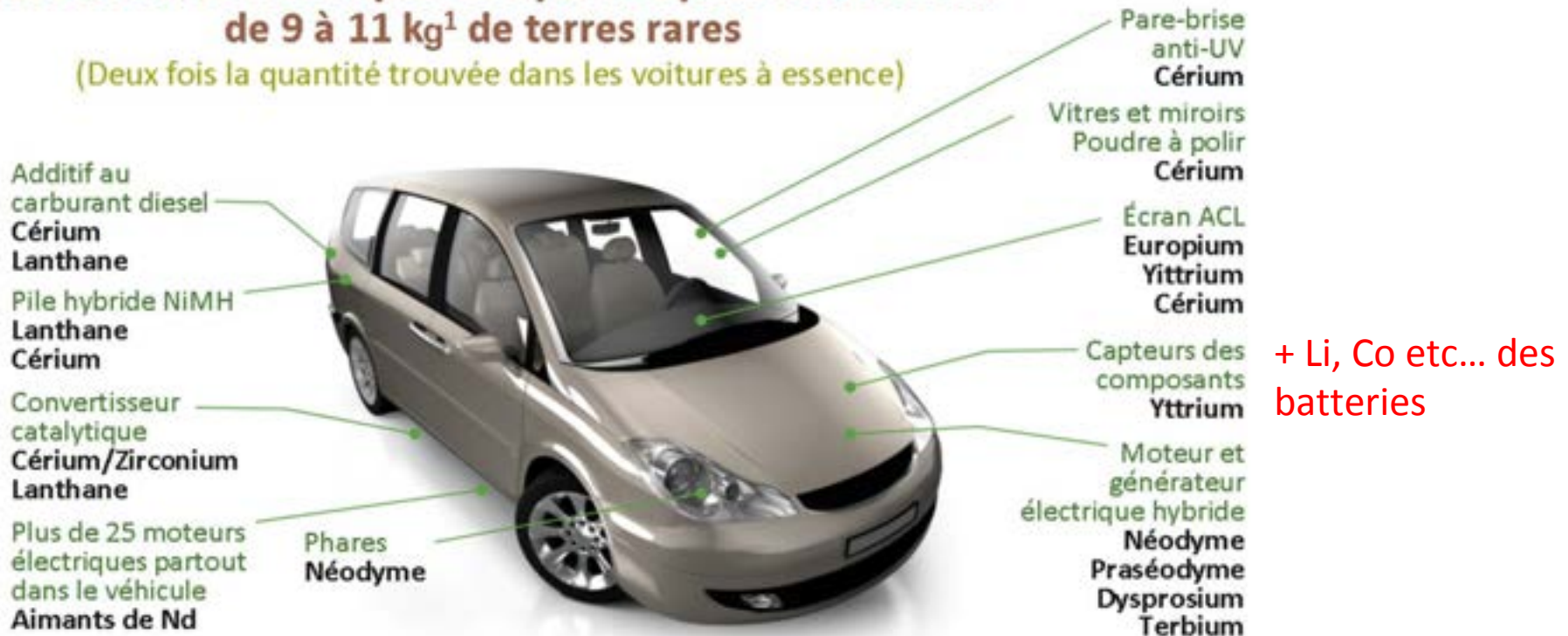
<http://www.mineralinfo.fr/page/besoins-en-ressources-minerales-realiser-transition-energetique>

Ressources minérales dans le contexte de la transition énergétique ?

Transition énergétique = fort impact pour certains métaux

Les voitures électriques et hybrides peuvent contenir de 9 à 11 kg¹ de terres rares

(Deux fois la quantité trouvée dans les voitures à essence)



¹Source : « The Race for Rare Metals », The Globe and Mail, 16 juillet 2011

https://mern.gouv.qc.ca/mines/quebec-mines/2016-10/images/Terres_rares_auto.jpg

Ressources minérales dans le contexte de la transition énergétique ?

Répondre à ces besoins

Le développement des technologies permettant la production d'énergie non carbonée entraîne un accroissement de la demande en métaux.

Deux possibilités :

- Production primaire depuis le minerai



Mine de cuivre de Chuquicamata (Chili) (Source : Revista Aera Minera)

- Production depuis les sources secondaires => le recyclage

Tri du cuivre en vue de son recyclage

(Source : www.prix-cuivre.com)

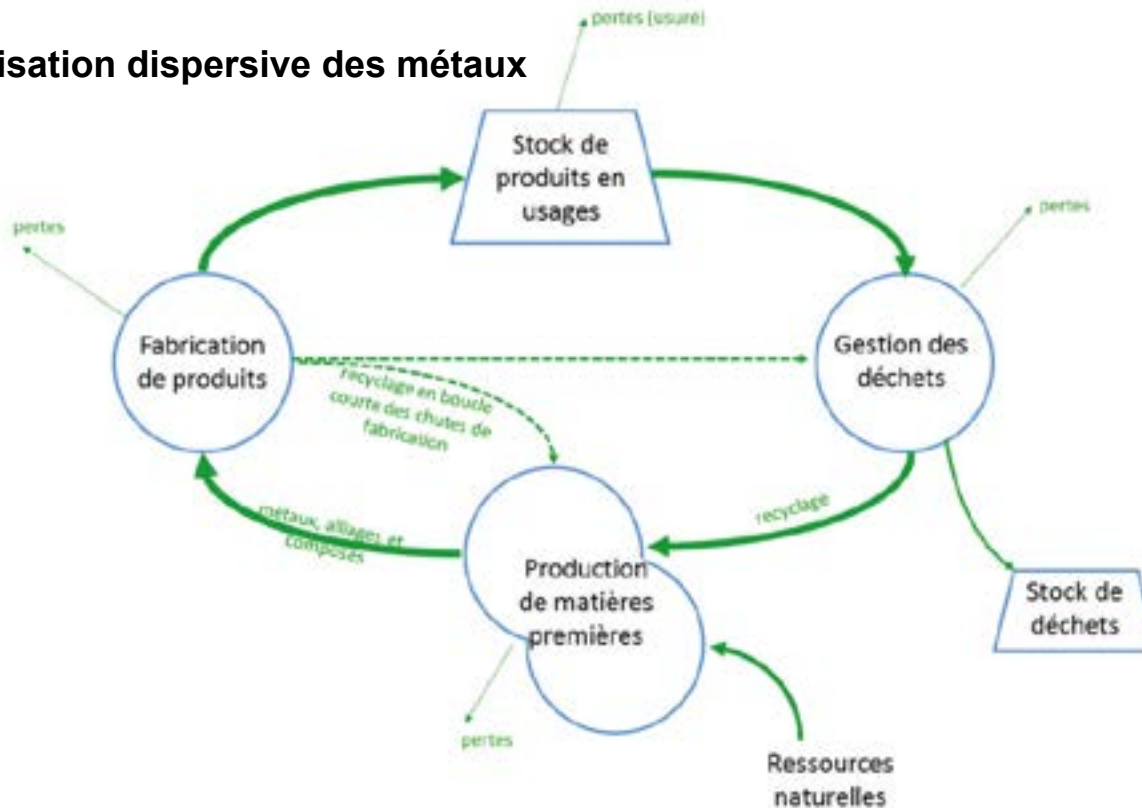


Ressources minérales dans le contexte de la transition énergétique ?

Insuffisance du recyclage pour satisfaire la demande

Dans une perspective de la poursuite de la croissance de la consommation, toutes les projections indiquent que le recyclage seul ne permet pas de satisfaire la demande.

Utilisation dispersive des métaux



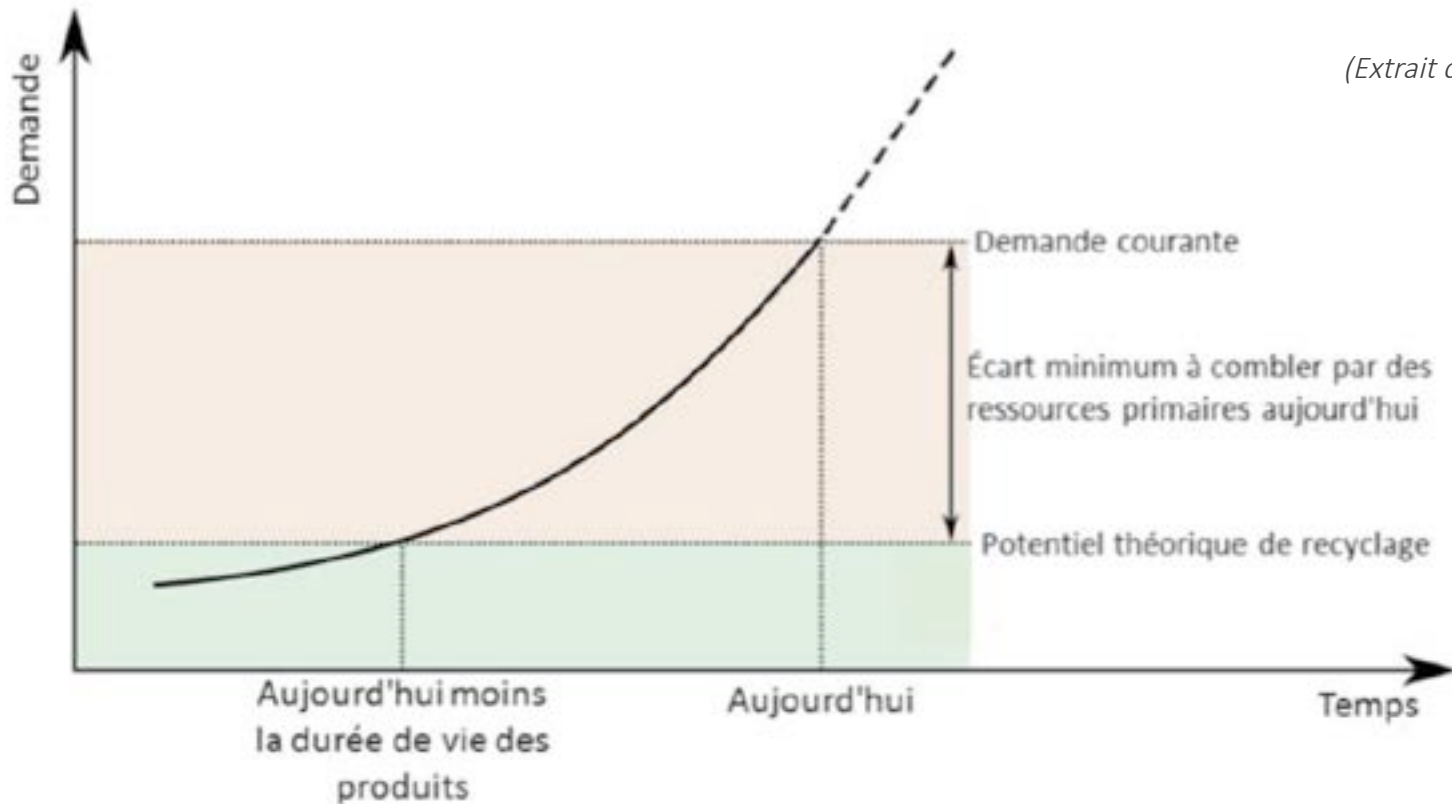
Cycle des matières premières

(Extrait de Labbé, 2016)

Ressources minérales dans le contexte de la transition énergétique ?

Insuffisance du recyclage pour satisfaire la demande

Durée de vie des produits = « temps d'immobilisation »



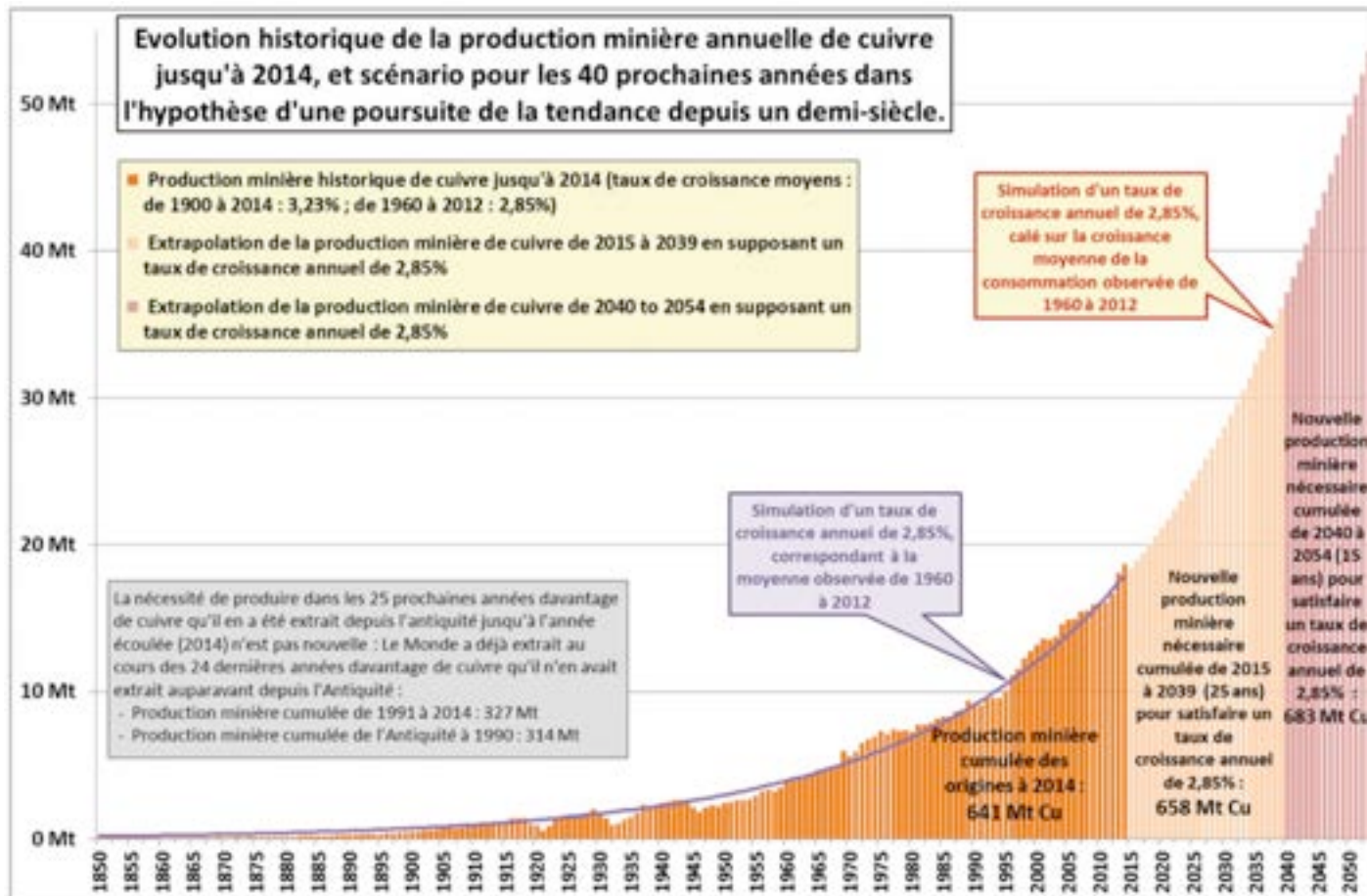
(Extrait de Labbé, 2016)

Ressources minérales dans le contexte de la transition énergétique ?

Insuffisance du recyclage pour satisfaire la demande

Exemple du cuivre

(Extrait de Labbé, 2016)

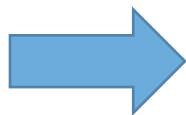


Ressources minérales dans le contexte de la transition énergétique ?

Insuffisance du recyclage pour satisfaire la demande

Procédés de recyclage non rentables ou non développés

Métaux des nouvelles technologies non disponibles (par exemple les terres rares des générateurs éoliens)



Production primaire incontournable



Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

LE CUIVRE

Elément chimique de numéro atomique 29, symbole Cu

- Métal de transition chalcophile
- Deux isotopes stables connus ^{63}Cu et ^{65}Cu (proportion 70/30)
- Plus ancien métal utilisé par l'humanité
 - Point de fusion relativement bas (1084 °C)
 - Oxyde de cuivre facilement réductible
 - Conductivités électriques ($59,6 \times 10^6 \text{ S.m}^{-1}$) et thermiques ($401 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) très élevées
 - Métal résistant à la corrosion, très malléable mais tenace
 - Utilisations : conducteur électrique, échangeur de chaleur, alliages, supraconducteurs, armement, applications biomédicales, propriétés antibactériennes.

Véhicule hybride

45 kg

Bourque (2016)

Eolienne

4 t

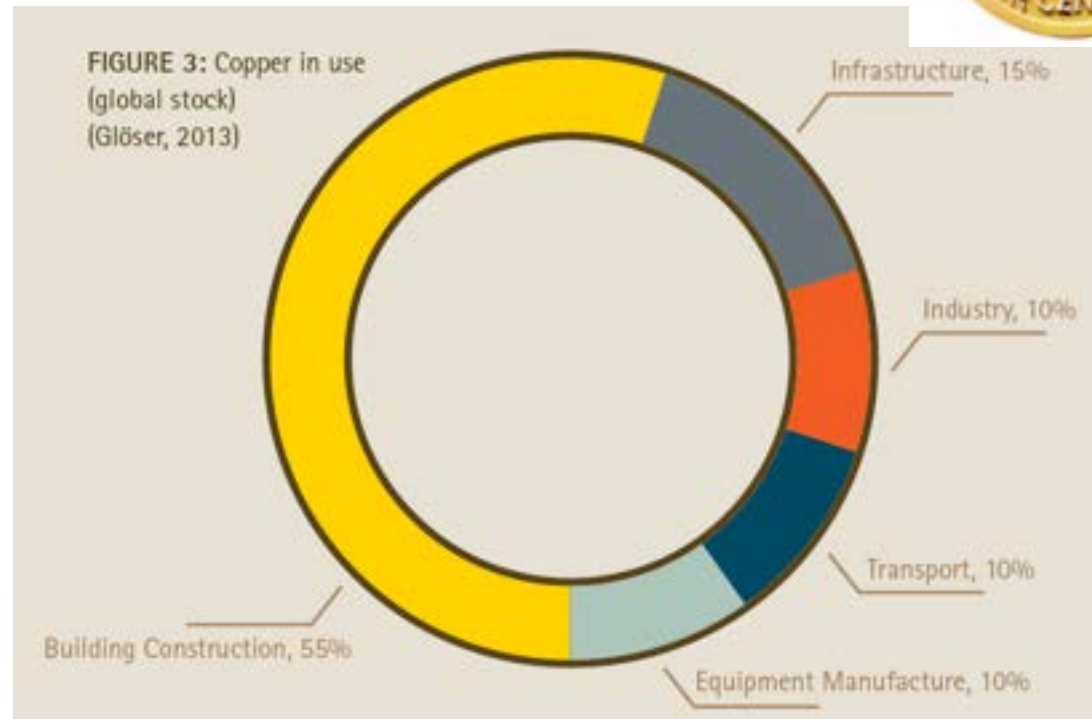
Bourque (2016)

Cuivre natif – Bou N'has mine, Maroc (www.spiriferminerals.com)

Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

LE CUIVRE

Les principales utilisations



International Copper Association (ICA, 2014)

Cuivre natif – Bou N'has mine, Maroc (www.spiriferminerals.com)

Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

Tout nouveau projet minier débute par l'exploration

Le choix de la zone à prospector est déterminé à partir des connaissances géologiques et métallogéniques pour la ressource recherchée.

EXPLORATION					
STADE	RECONNAISSANCE RÉGIONALE	TESTS DES INDICES	ETUDE DES INDICES	DÉTERMINATION DE L'ENVELOPPE MINÉRALISÉE	DÉFINITION DES CORPS MINÉRALISÉS
TECHNIQUES ET MÉTHODES D'ÉVALUATION	STRATÉGIQUE	TACTIQUE	TRAVAUX DE SUBSURFACE	SONDAGES	SONDAGES ET TRAVAUX MINIERES
	*Géologie *Télédétection *Géologie *Géochimie *Géophysique aéroportée	*Géochimie sol/roche *Levés géophysiques *Levés géologiques *Caractérisation	*Puits et tranchées *Tarières *Sondages courts (destructifs) *Extrapolation des données géologiques	*Sondages Phase 1 1000-5000 m *Etude de cible Phase 2 5000-10 000 m *Essais préliminaires de traitement	*Sondages systématiques *Galeries d'exploration *Certification de la continuité de la minéralisation *Géostatistique *Essais de traitement
DIMENSIONS SURFACES	2D	2D	2,5D	3D	3D
ECHELLES	x 100-1 000 km ²	x 1-10 km ²	manque d'infos en profondeur	SECTIONS	MODÈLES 3D
OBJECTIF	DÉTECTION D'ANOMALIES	IDENTIFICATION DES CIBLES	SÉLECTION DES CIBLES	ETUDE DE CIBLE ESTIMATION DES RESSOURCES	EVALUATION DES RESSOURCES ETUDE CONCEPTUELLE
DURÉE	1 À 2 ANS	1 À 2 ANS	1 À 2 ANS	1 À 3 ANS	1 À 3 ANS

Extrait de Charles et al. (2017) (www.mineralinfo.fr)

Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

LE CUIVRE

Principaux minéraux de cuivre

		Wt. % Cu	Densité (g/cm ³)
Chalcopyrite	CuFeS_2	34	4.1-4.3
Enargite	Cu_3AsS_4	47	4.4
Cu-tetrahédrite	$\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	max. 45	4.6-5.1
Cu-tennantite	$\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$	max. 53	4.6-5.1
Chalcocite	Cu_2S	80	5.5-5.8
Digenite	Cu_9S_5	79	5.6
Covellite	CuS	66	4.7
Cuprite	Cu_2O	88	6
Malachite	$\text{Cu}_2(\text{OH})_2\text{CO}_3$	57	4
Atacamite	$\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$	59	3.7

D'après Pohl (2010)

Principaux minerais :

Chalcopyrite

Pohl (2010)

Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

LE CUIVRE

Principaux minéraux de cuivre

	Moyenne
Croûte continentale	68 ppm
Roches mafiques	100 ppm
Roches felsiques	10 ppm
Pélites	70 ppm
Carbonates	6 ppm
Vents hydrothermaux	100 à 500 ppm
Gaz volcaniques à HCl	280 ppm

D'après Pohl (2010)



Principaux minerais :

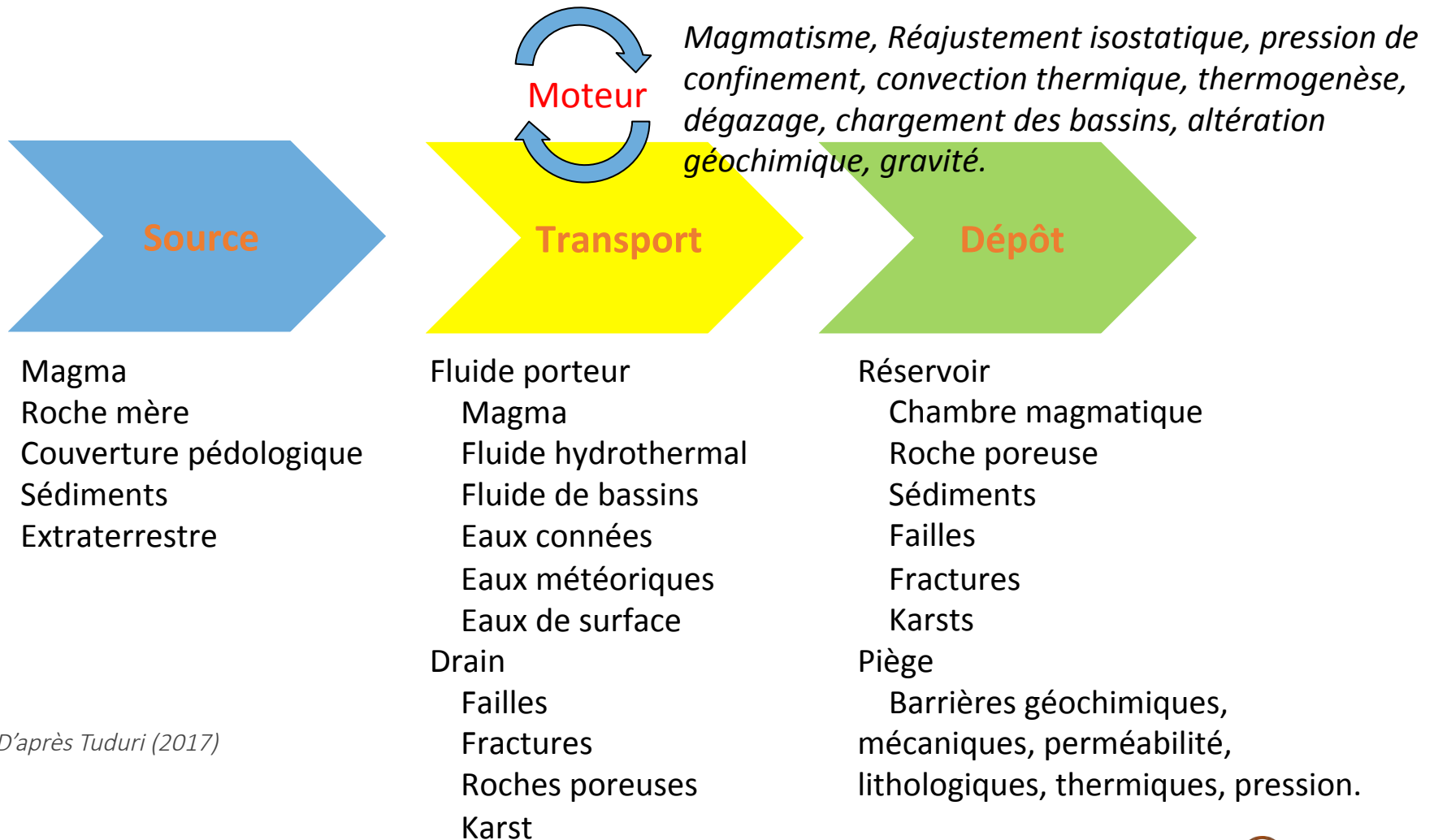
3-5 % à

0,3 %

Pohl (2010)

Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

Notion de base : les processus à l'origine des gisements



D'après Tuduri (2017)

Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

Les principaux gisements de cuivre

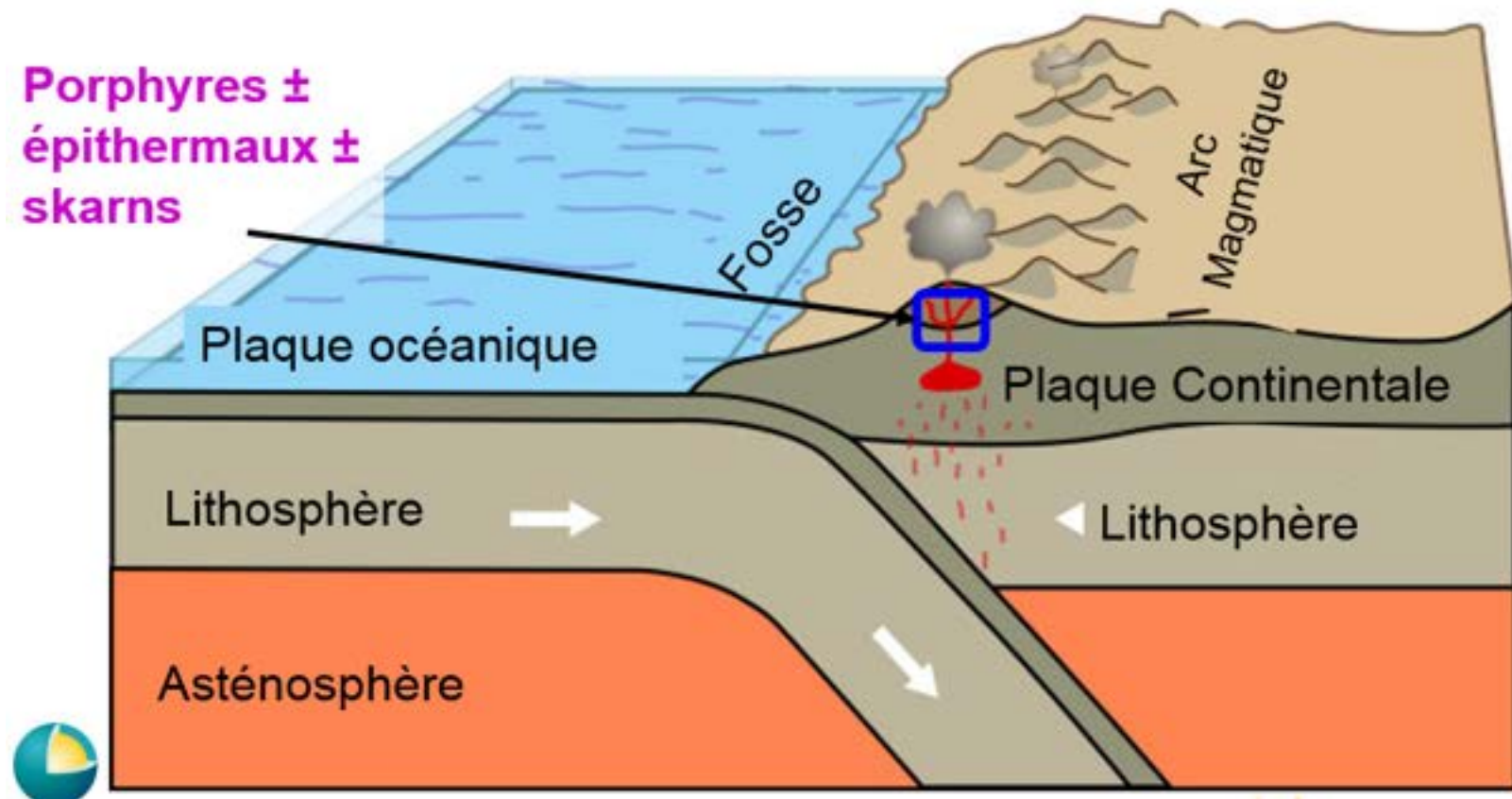
Des gisements d'origine magmatique, hydrothermale et/ou supergène :

- Gisements à Cu-Ni-Co-Fe des roches magmatiques mafiques (Noril'sk, Russie, Sudbury, Canada)
- Carbonatite à Cu de Palabora (Afrique du Sud) => unique
- Skarns
- **Porphyres à Cu (Au, Mo)**
- IOCG (Olympic Dam, Australie)
- Veines à Cu (Sn) associées à des intrusions. Exemples : Cornouailles
- Massive sulphide deposits. Type Chypre (Outokumpu, Finland) et type Volcanic-hosted massive sulphides (VMS ; Ceinture Pyriteuse Ibérique)
- Gisements stratoïdes et stratiformes diagénétiques/hydrothermaux encaissés dans des sédiments (Kupferschiefer, Allemagne et Pologne, Copper Belt d'Afrique Centrale)
- Gîtes associés à des saumures hydrothermales de métamorphisme rétrograde (Mt Isa, Australie ; Copper Belt Afrique Centrale)
- Gisements secondaires d'origine supergène à minerai oxydé (Mt Oxide, Australie)

Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

Les gisements de type porphyre

Localisation en limite de marge active de type andéenne

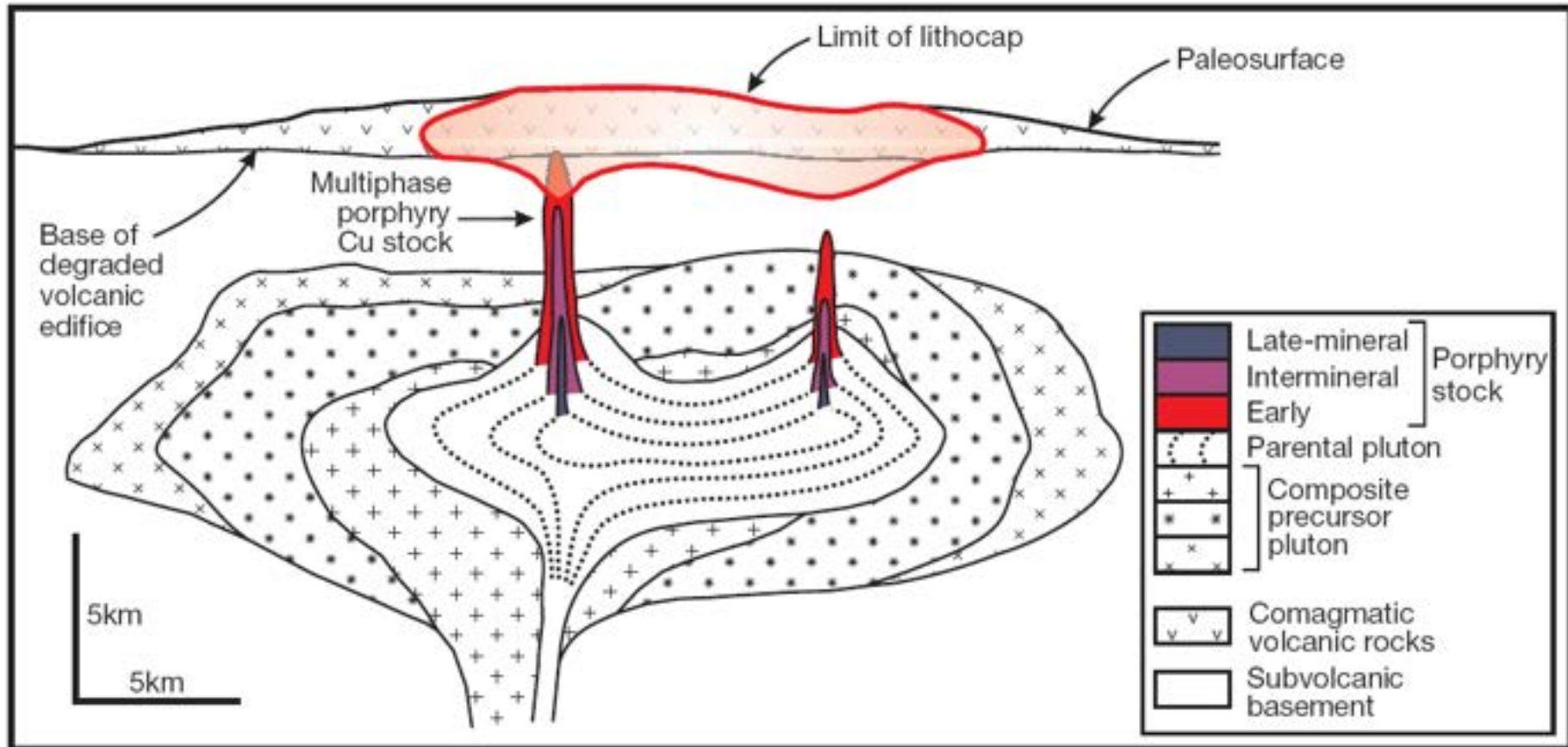


D'après Eilu, 2017

Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

Les gisements de type porphyre

Evolution d'un système magmatique depuis la profondeur vers la surface



Extrait de Siliteo, 2010

Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

Les gisements de type porphyre

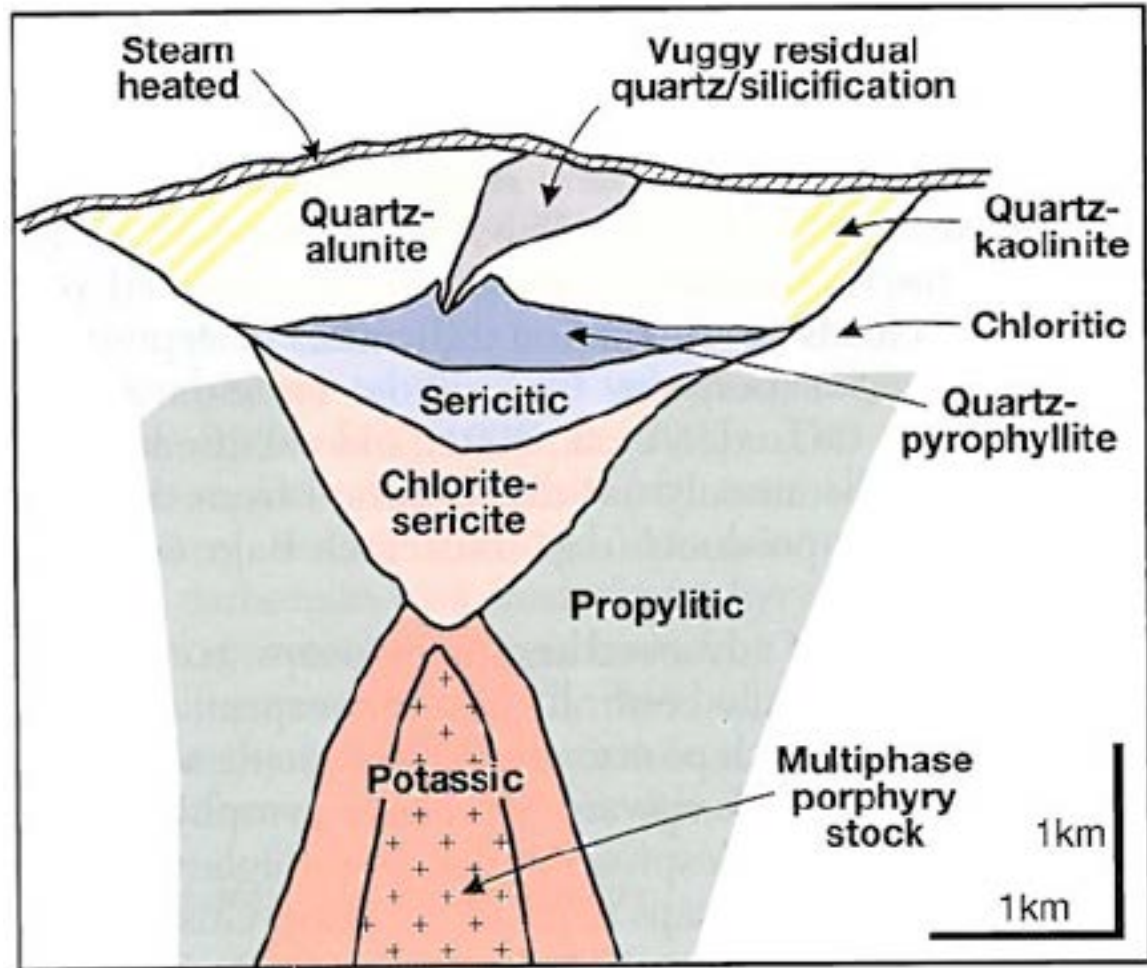
Succession d'altération suivant le refroidissement du système :

- Hautes températures, métasomatisme potassique (Bt + Kf) et altération propylitique (Chl+ep+ab+carbonates)
- Puis au dessus de l'intrusion, altération argillique qui forme des assemblages à Séricite-Chlorite-argiles
- Séricitisation (Qtz+séricite) qui peut remplacer les assemblages précédents
- Argilique avancée (Qtz+alunite, etc...)



Signatures minéralogiques et géochimiques

D'après Siliteo, 2010



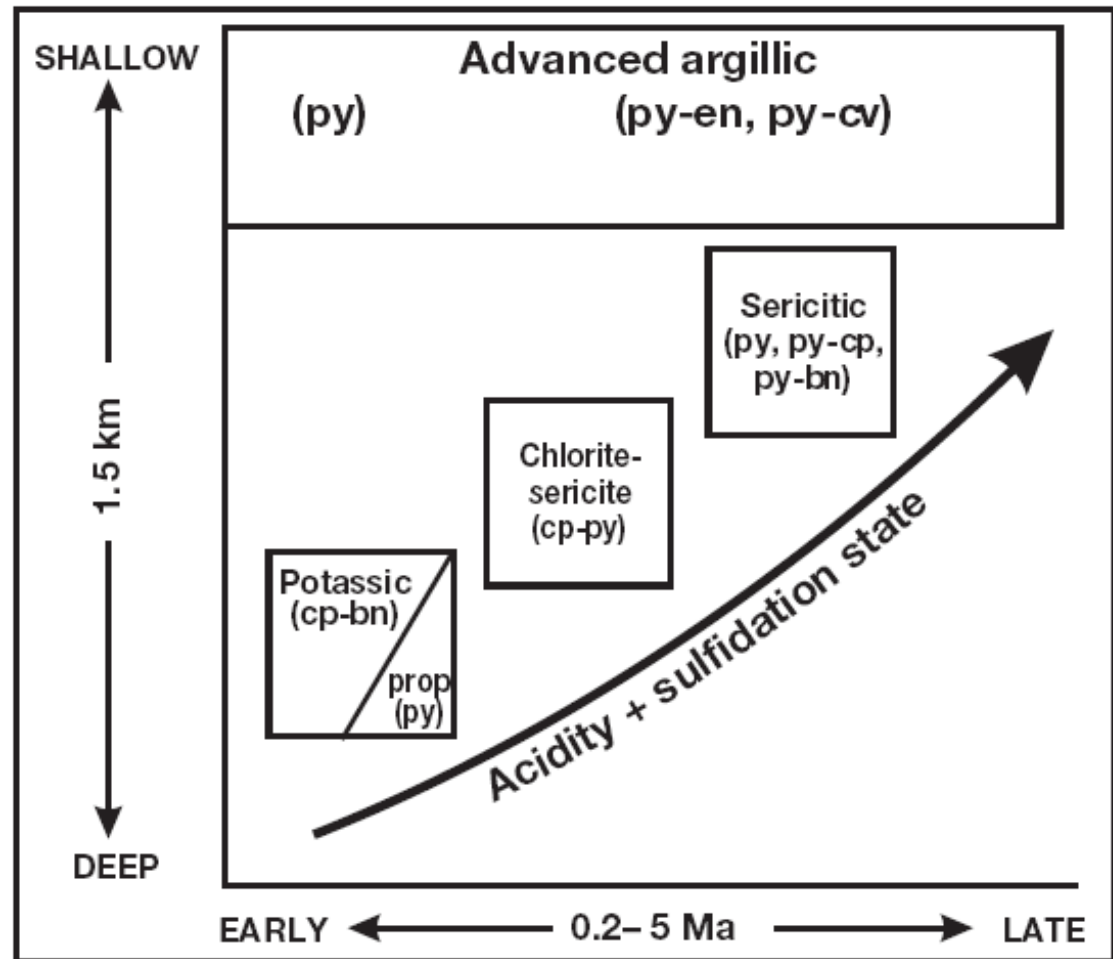
Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

Les gisements de type porphyre

Succession d'altération suivant le refroidissement du système :

- Hautes températures, métasomatisme potassique (Bt + Kf) et altération propylitique (Chl+ep+ab+carbonates)
- Puis au dessus de l'intrusion, altération argillique qui forme des assemblages à Séricite-Chlorite-argiles
- Séricitisation (Qtz+séricite) qui peut remplacer les assemblages précédents
- Argilique avancée (Qtz+alunite, etc...)

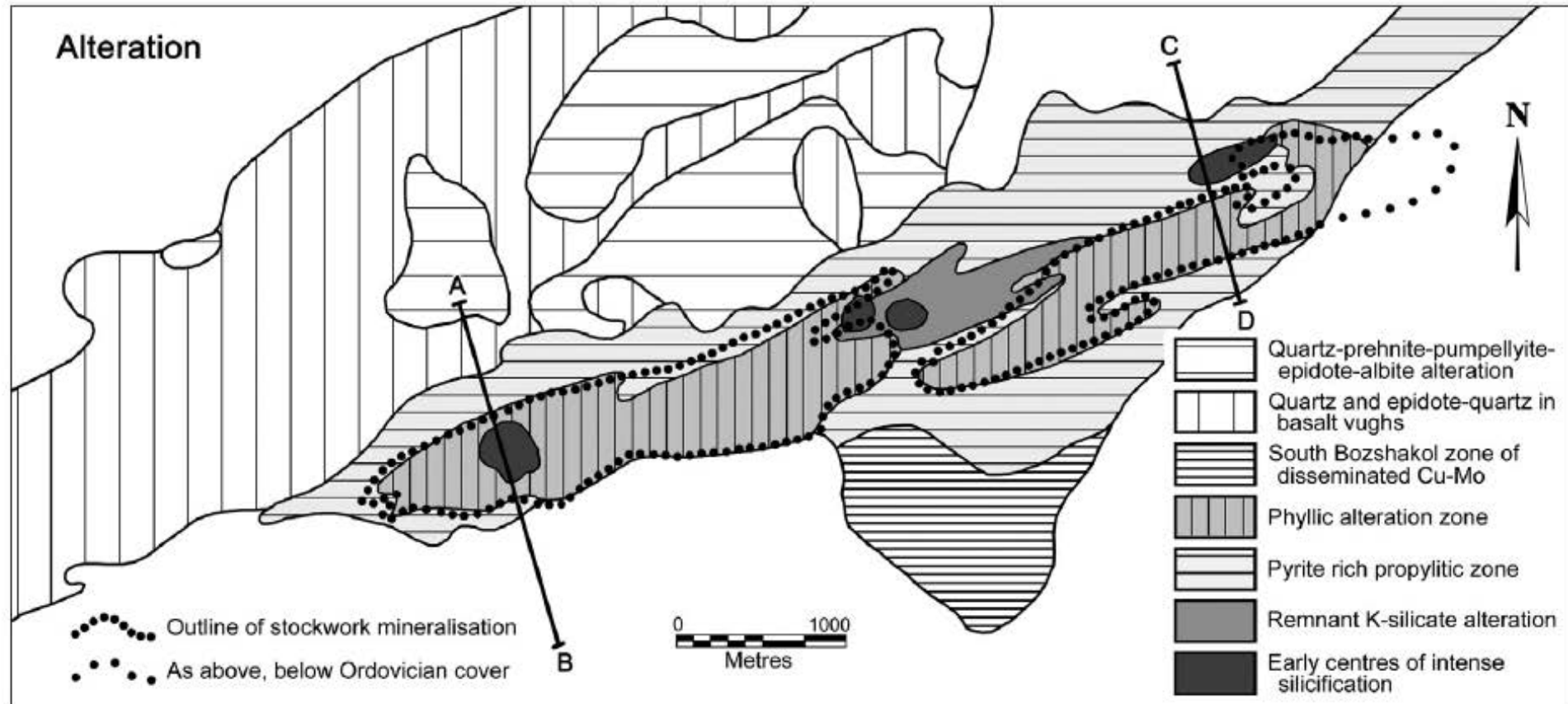
D'après Sillitoe, 2010



Signatures minéralogiques et géochimiques

Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

Les gisements de type porphyre



Bozshakol, Kazahstan: 1,700 Mt @ 0.35 % Cu, 0.14 ppm Au - Extrait de Seltmann et al, 2014

Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

Les gisements de type porphyre

Réseau complexe de veines et veinules minéralisées ou non



Extrait de <http://www.segweb.org>

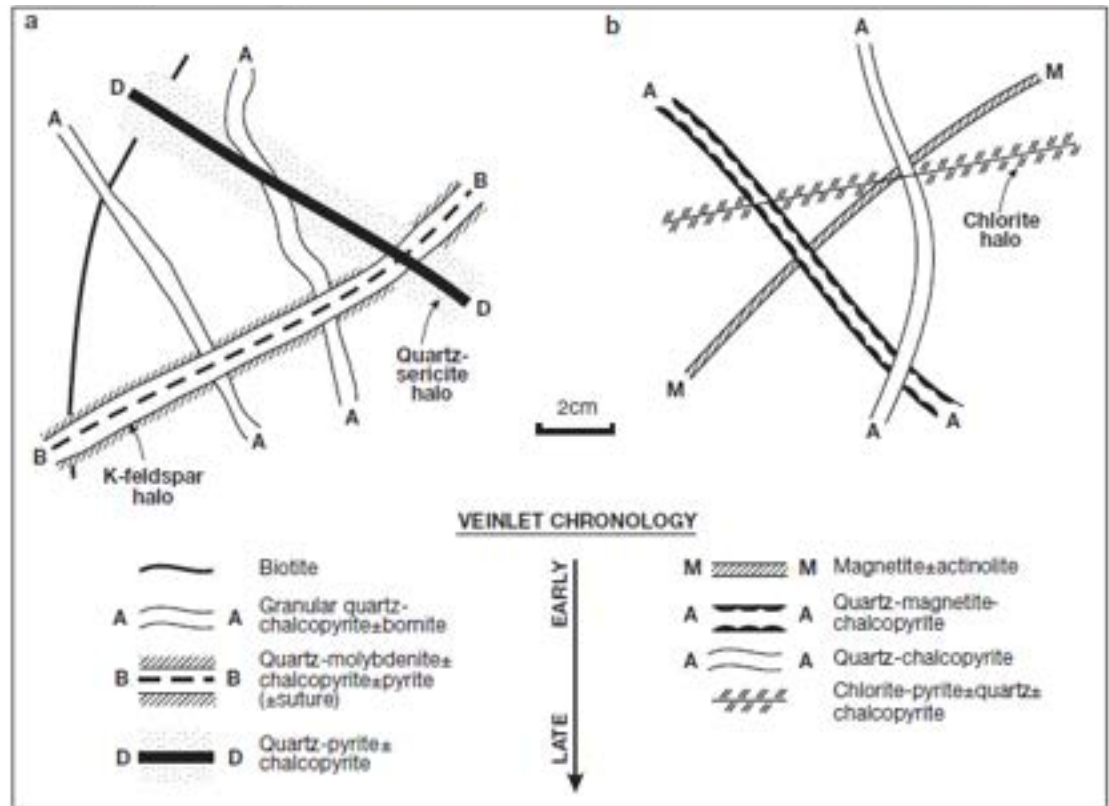


FIG. 13. Schematic chronology of typical veinlet sequences in a. porphyry Cu-Mo deposits and b. porphyry Cu-Au deposits associated with calc-alkaline intrusions. Porphyry Cu-Au deposits hosted by alkaline intrusions are typically vein poor (Barr et al., 1976; Lang et al., 1995; Sillitoe, 2000, 2002). Background alteration between veinlets is mainly potas which is likely to contain more K-feldspar in the Mo-rich than the Au-rich porphyry Cu stockworks. Note the common sense of B- and D-type veinlets from Au-rich porphyry Cu stockworks and M-, magnetite-bearing A-, and chlorite-rich veinlets from Mo-rich porphyry Cu stockworks. Veinlet nomenclature follows Gustafson and Hunt (1975; A, B, and D types); Arancibia and Clark (1996; M type).

Extrait de Sillitoe, 2010



Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

Les gisements de type porphyre

Contrôle structural évident pour la mise en place des porphyres à Cu à l'échelle de la province / des districts



Important pour l'exploration

Taille moyenne des gisements de type porphyre :

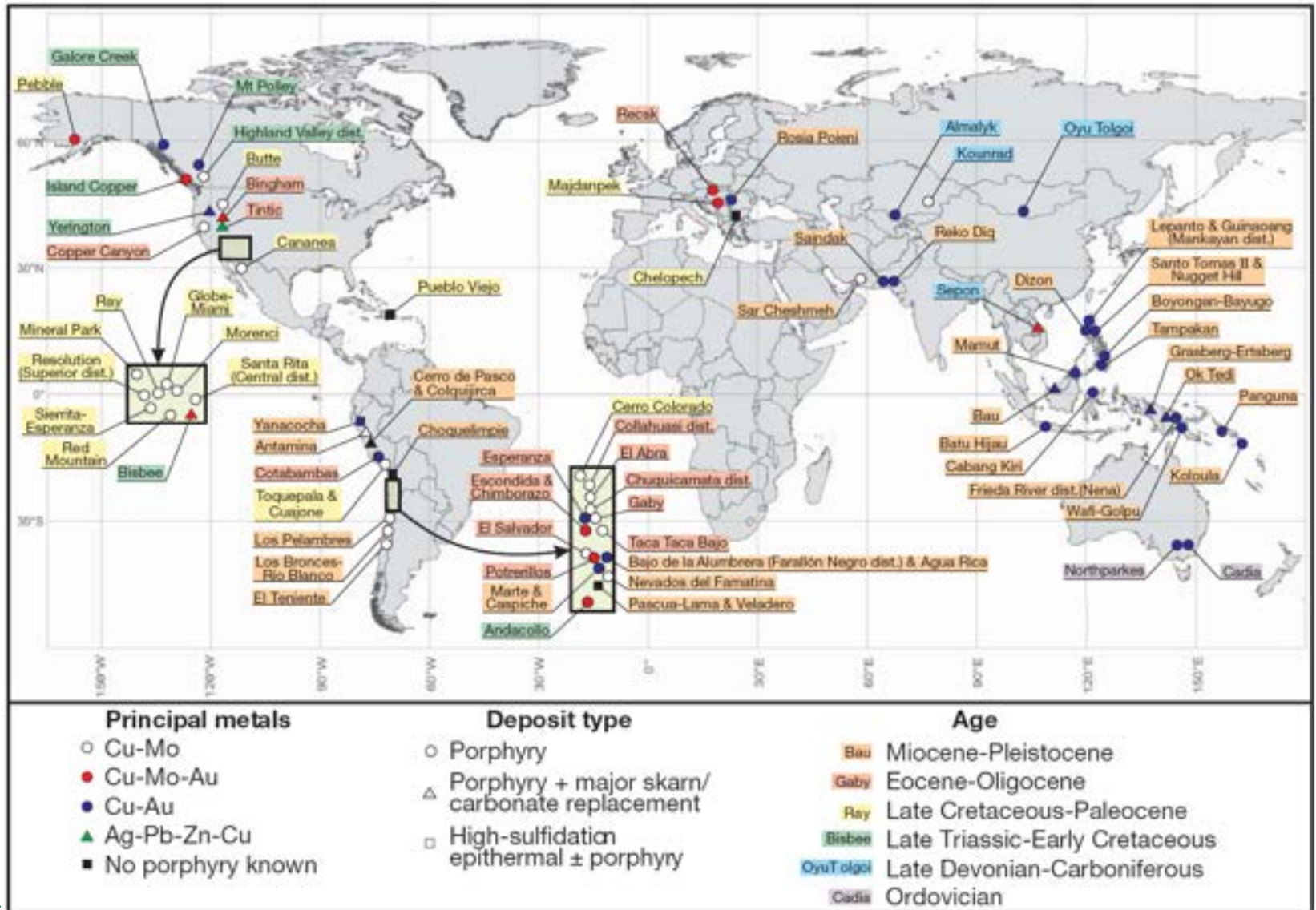
140 millions de tonnes ! Et certains dépassent les 2 milliards de tonnes pour une teneur moyenne $\approx 0,35\%$

Extrait de Silitoe, 2010

Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

Principaux gisements de type porphyre

Extrait de Sillitoe, 2010



Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

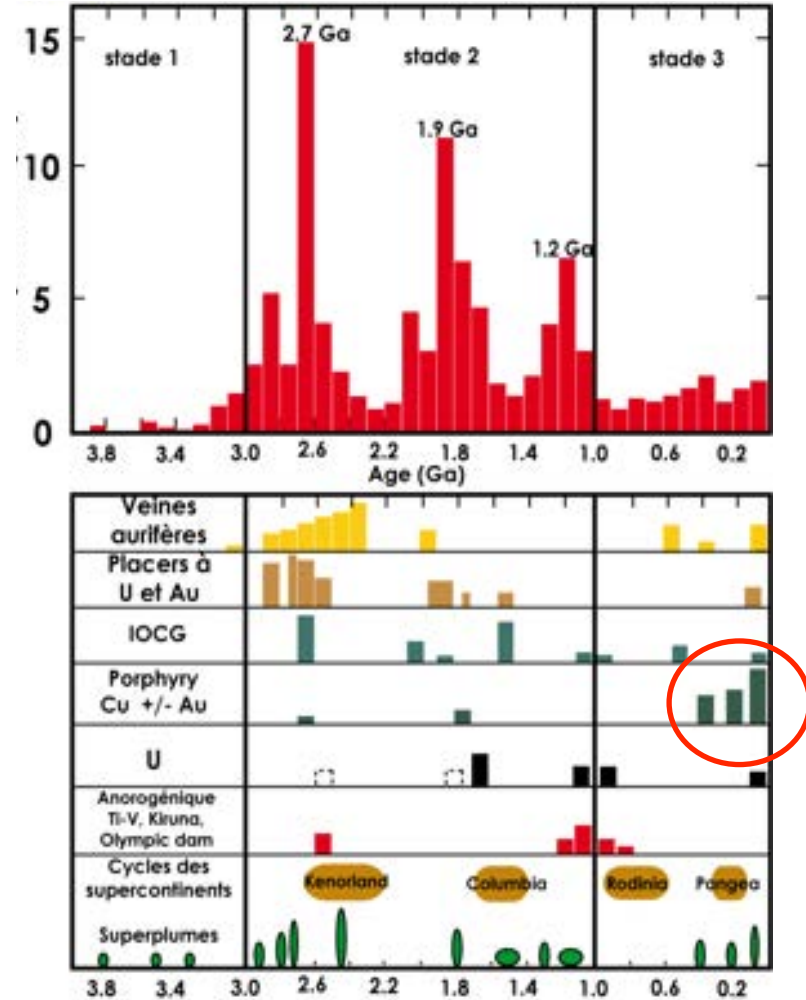
LES GISEMENTS DE TYPE PORPHYRE

Ils correspondent à environ 60 % des ressources mondiales

- Répartis sur tous les continents mais très grand nombre de gisements dans les cordillères ouest-américaines
- Co-produits : Au, Mo ± Re, Ag, Pd, Te, Se, Bi, Zn, Pb

Principaux gisements Phanérozoïques

RÉPARTITION TEMPORELLE DES PRINCIPAUX TYPES DE GISEMENT

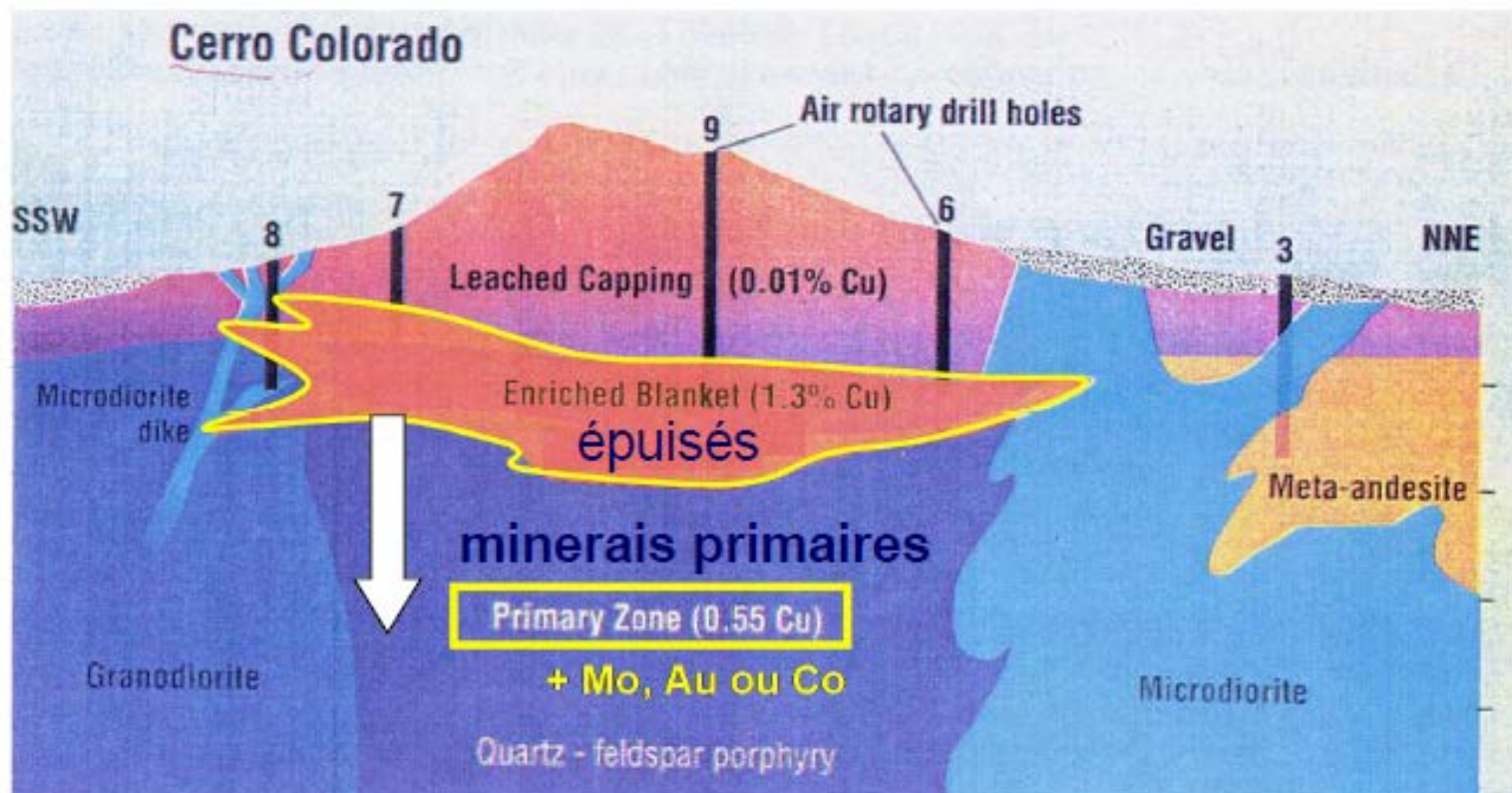


Extrait de Tuduri, com. pers.

Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

Principaux gisements de type porphyre

- Processus d'altération supergène peuvent conduire à des enrichissements significatifs, mais la plupart ont été exploités



Le cycle minier : l'exploitation (exemple du cuivre)

Durée de vie d'une mine (≈15 ans à plus de 100 ans)



Construction des installations de concassage de la mine de Kanmantoo (Australie) – Extrait de <http://www.milchem.com.au>

Construction (2-5 ans)



Exploitation



Fermeture et remédiation



Bioréacteur géré par la compagnie Veolia au sein de l'ancienne mine à ciel ouvert de Woodlawn - Extrait de <https://industry.gov.au/resource/Programs/LPSD/Mine-closure/Sustainable-development-and-closure/Pages/Post-mining-land-use-opportunities.aspx>

Le cycle minier : l'exploitation (exemple du cuivre)

Les principaux types d'exploitation

- La mine à ciel ouvert
- La mine souterraine
- L'exploitation par dissolution et lixiviation in situ



Mine souterraine de El Teniente (Chili) – Extrait de Mining Journal

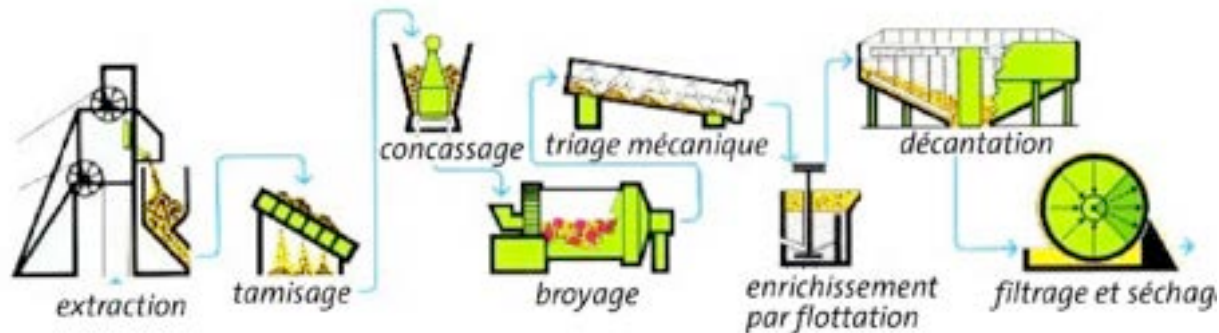


Choix de la méthode d'exploitation est réalisé sur la base des **paramètres géologiques** (type de gîte, profondeur, extension, morphologie, minéralogie, fracturation) et **économiques** (tonnage, teneur) du gisement (+ savoir-faire de l'exploitant, paramètres socio-environnementaux).

Le cycle minier : l'exploitation (exemple du cuivre)

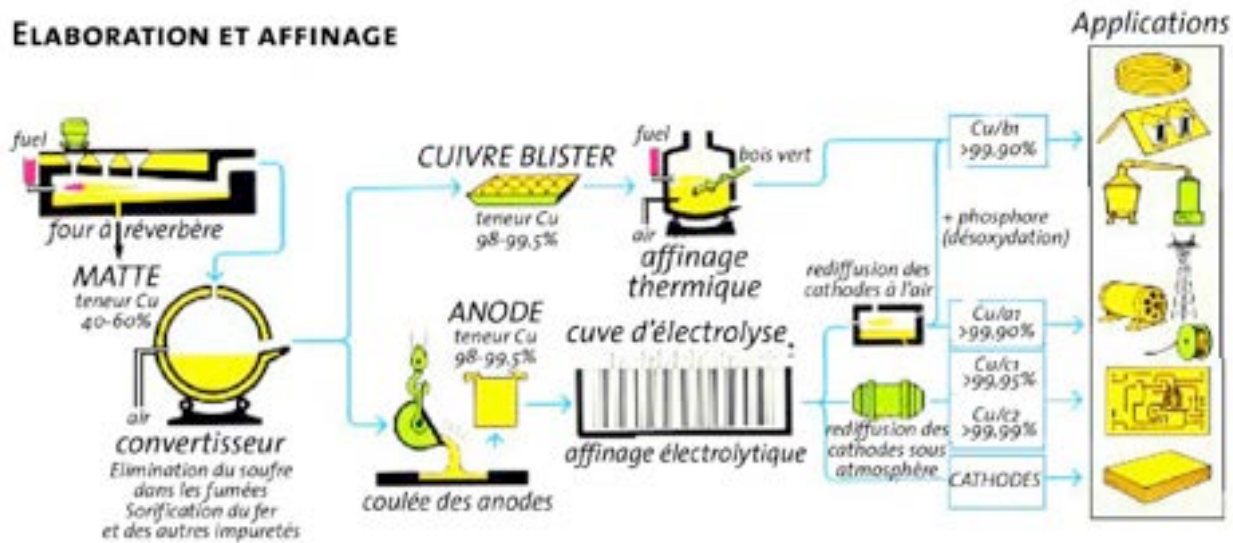
Les principaux types d'exploitation

TRAITEMENT DU MINERAI



Extrait de Poullard et al. (2017)
(www.mineralinfo.fr)

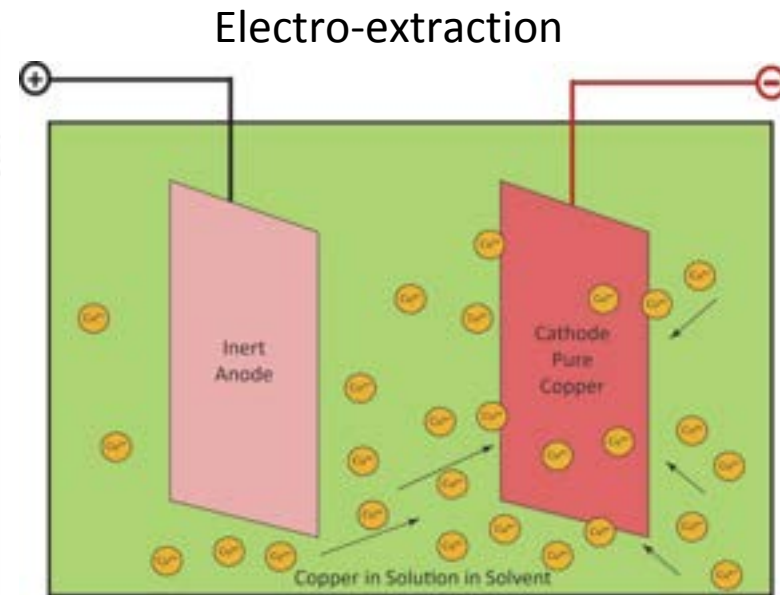
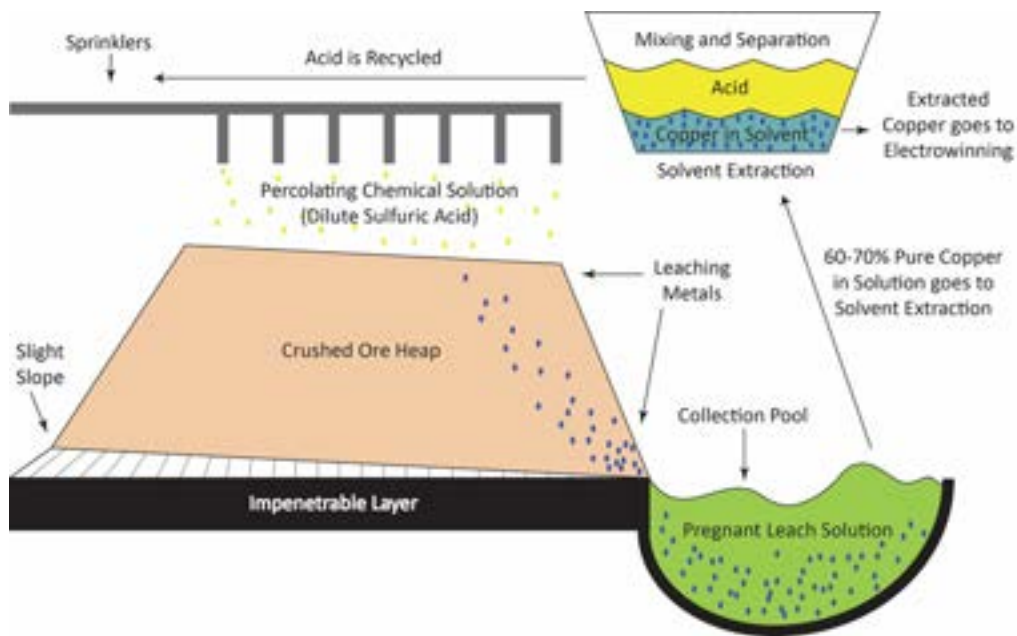
ELABORATION ET AFFINAGE



Le cycle minier : l'exploitation (exemple du cuivre)

Les principaux types d'exploitation

La lixiviation en tas (principalement pour minerai oxydé)



Extrait de <https://superfund.arizona.edu/learning-modules/tribal-modules/copper/processing>

Remarque : existence de procédés de biolixiviation (bactérien)

Le cycle minier : l'exploitation (exemple du cuivre)

Des mines à ciel ouvert gigantesques



Bingham Canyon (Utah, Etats-Unis) : 4 km de largeur, 1200 m de profondeur

Extrait de <http://www.miningglobal.com>

Le cycle minier : l'exploitation (exemple du cuivre)

Des mines à ciel ouvert gigantesques



Bingham Canyon (glissement de terrain d'avril 2013, Utah, Etats-Unis)

Extrait de <https://boingboing.net/2013/04/22/inside-a-mile-deep-open-pit-co.html>

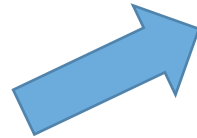
Le cycle minier : l'exploitation (exemple du cuivre)

Des mines à ciel ouvert gigantesques



Ancienne mine de cuivre Island Copper (Colombie Britannique, Canada) dans les années 1990
http://archives.library.uvic.ca/featured_collections/esa/fonds_island_copper_mines/default.html

- Végétalisation
- Mise en eau



Ancienne mine de cuivre Island Copper (Colombie Britannique, Canada) dans les années 2010
<http://vlms.ca/history-of-island-copper-mine/>



Ancienne mine de cuivre de Berkeley (Montana, Etats-Unis) - Extrait de <http://www.losapos.com/openpitmines>

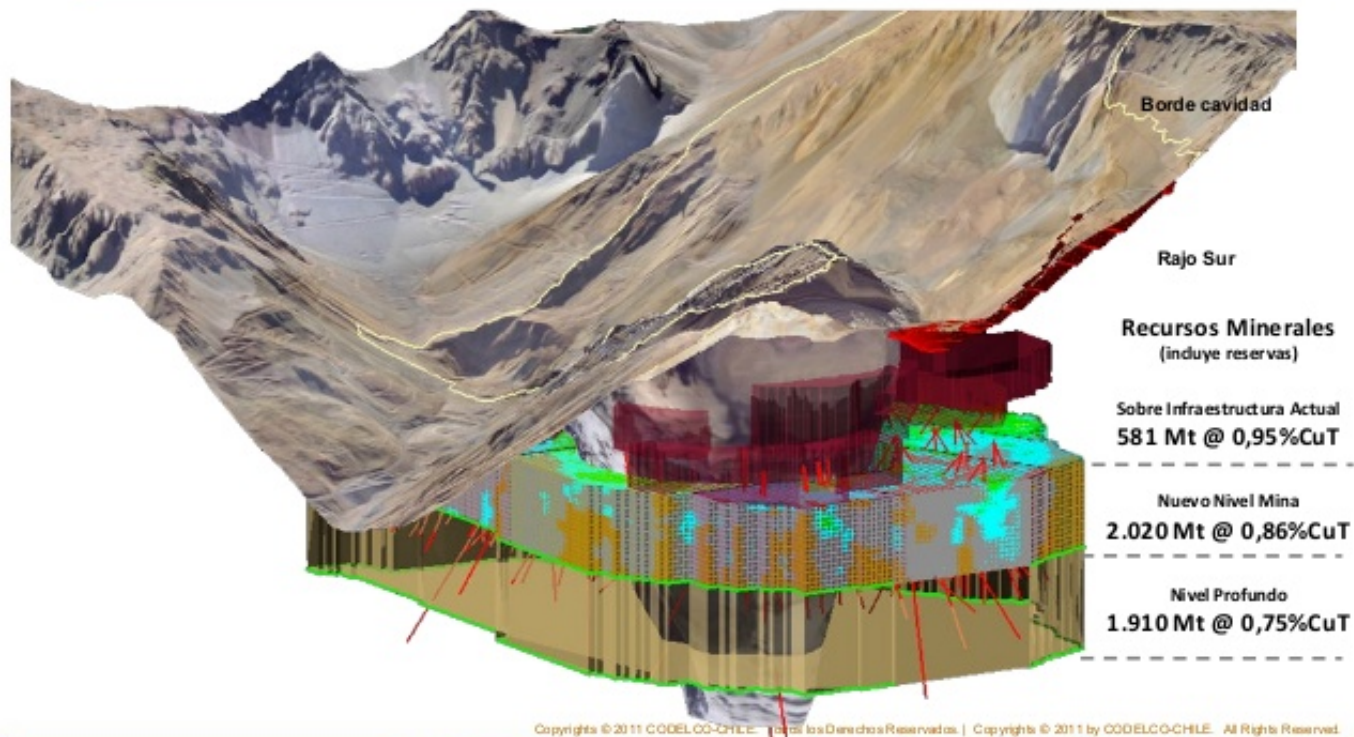
 **Qualité de l'eau**

Le cycle minier : l'exploitation (exemple du cuivre)

Développement des mines souterraines

Por qué del proyecto

El Teniente, un mega yacimiento de clase mundial



Mine de El Teniente
4000 km



Le cycle minier : l'exploitation (exemple du cuivre)

Gisements de type porphyre : gigantesques proportions de résidus

Plusieurs types de résidus

- Le « stérile » (=accéder au minerai)
- Les résidus de traitement (différents types correspondant aux différentes étapes)



Résidus de la mine de Chuquicamata (Chili)

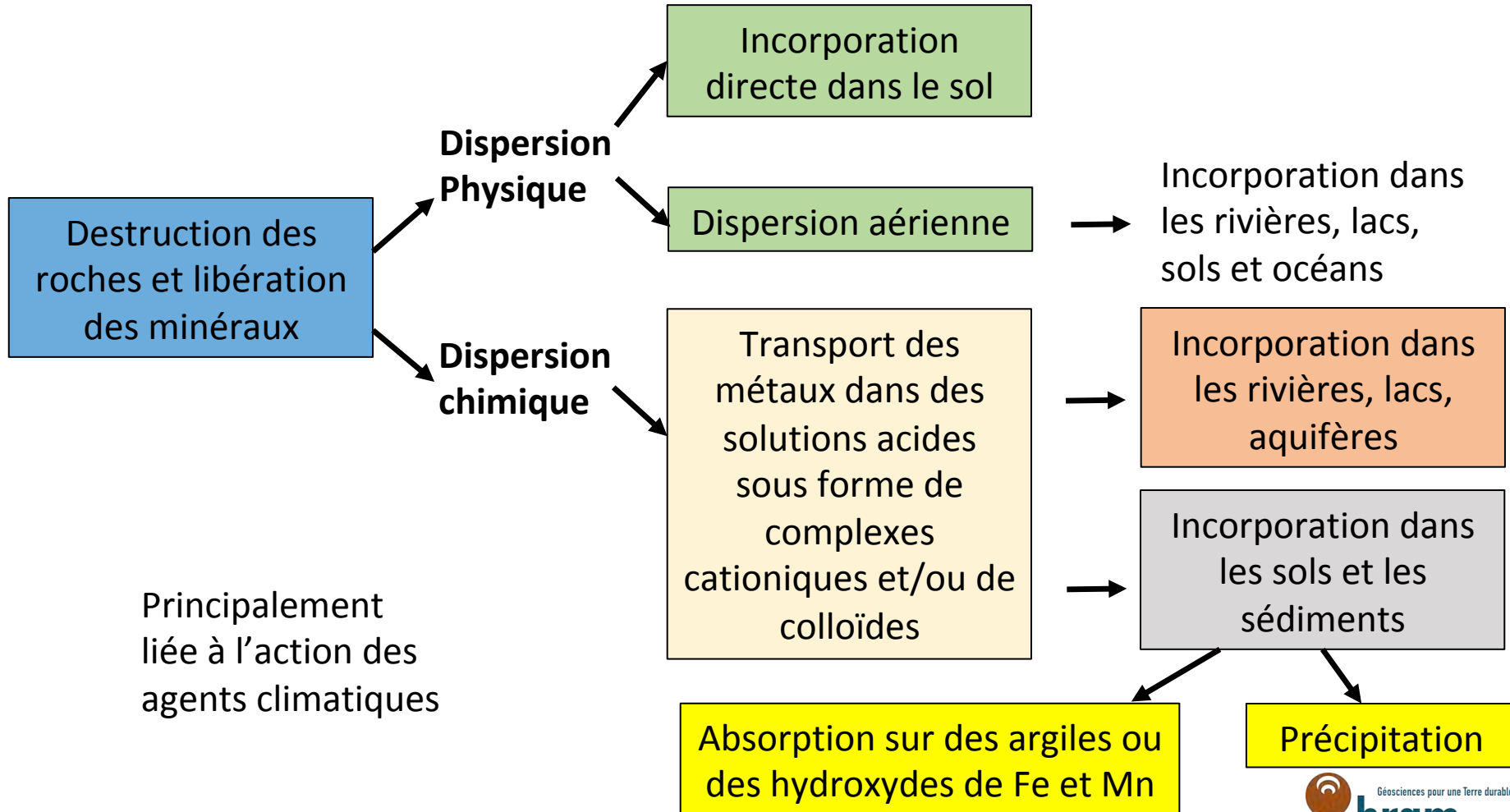
Source : <https://www.joelsartore.com>

Vue aérienne d'une mine de cuivre d'Arizona - Source : <https://www.joelsartore.com>

Le cycle minier : l'exploitation (exemple du cuivre)

Pollution diffuse liée à l'exploitation minière

D'après Herrmann & Zappettini (2016)



Principalement liée à l'action des agents climatiques

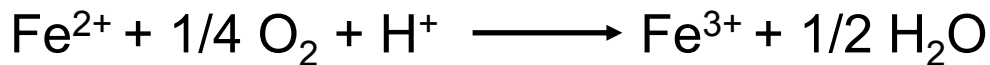
Le cycle minier : l'exploitation (exemple du cuivre)

Pollution diffuse liée à l'exploitation minière : drainage minier acide

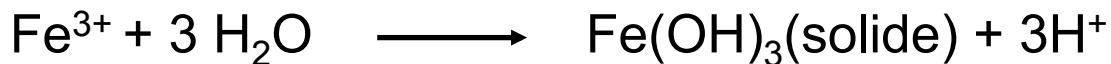
- Action de l'air et de l'eau de pluie qui oxydent les sulfures en produisant de l'acide



- L'ion ferreux est oxydé pour produire ion ferrique (avec neutralisation d'un peu d'acide)



- L'ion ferrique est hydrolysé et régénère de l'acide (+limonite)



- L'ion ferrique peut aussi devenir un agent très oxydant de la pyrite



Le cycle minier : l'exploitation (exemple du cuivre)

Pollution diffuse liée à l'exploitation minière : drainage minier acide

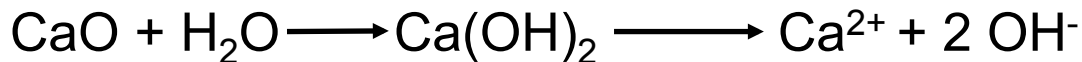
Exemple des gisements de type porphyre

- Enorme production de résidus
- Pyrite concentrée dans les résidus + autres sulfures
- Très faible capacité de neutralisation des roches encaissantes

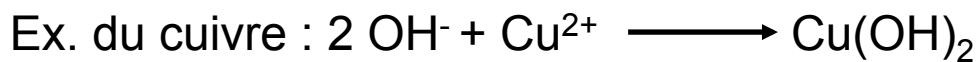


Rivière Aries (Roumanie)
Extrait de Levei et al. (2013)

Neutralisation du DMA : Exemple dissolution de roche carbonatée :



pH monte et la dissociation d'hydroxyde de calcium favorise la précipitation de métaux sous la forme d'hydroxyde



Le cycle minier : l'exploitation (exemple du cuivre)

Pollution diffuse liée à l'exploitation minière : drainage minier acide

Exemple de DMA lié à un gisement de type porphyre



Drainage minier acide de Rosa Poeni (Roumanie) - Extrait de Cottard (2017)

Le cycle minier : l'exploitation (exemple du cuivre)

Pollution diffuse liée à l'exploitation minière : drainage minier acide

Les moyens de mitigation (avant et à la fermeture)

Caractérisation amont

- Caractérisation fine des lithologies et minéralogie concernée (gîtologie environnementale)

Gestion et traitement des DMA

- Noyage des stocks de résidus sous une fine tranche d'eau (=> contexte anoxique)
- Drainage des eaux de ruissellement et mise en place une couverture imperméable naturelle sur les résidus (puis possible couverture végétale)
- Aménagement de zones humides artificielles (association microbienne et végétaux permettant d'éliminer les métaux dissouts)
- Création de barrière ou drains calcaires anoxiques

Le cycle minier : l'exploitation (exemple du cuivre)

Des mines à ciel ouvert gigantesques = stocks énormes de résidus

- Limitation par une bonne adaptation de la fosse et des procédés de traitement
- Isolement et revégétalisation



Projet de remédiation au stade de la faisabilité du projet de mine d'or de Bau (Malaisie)

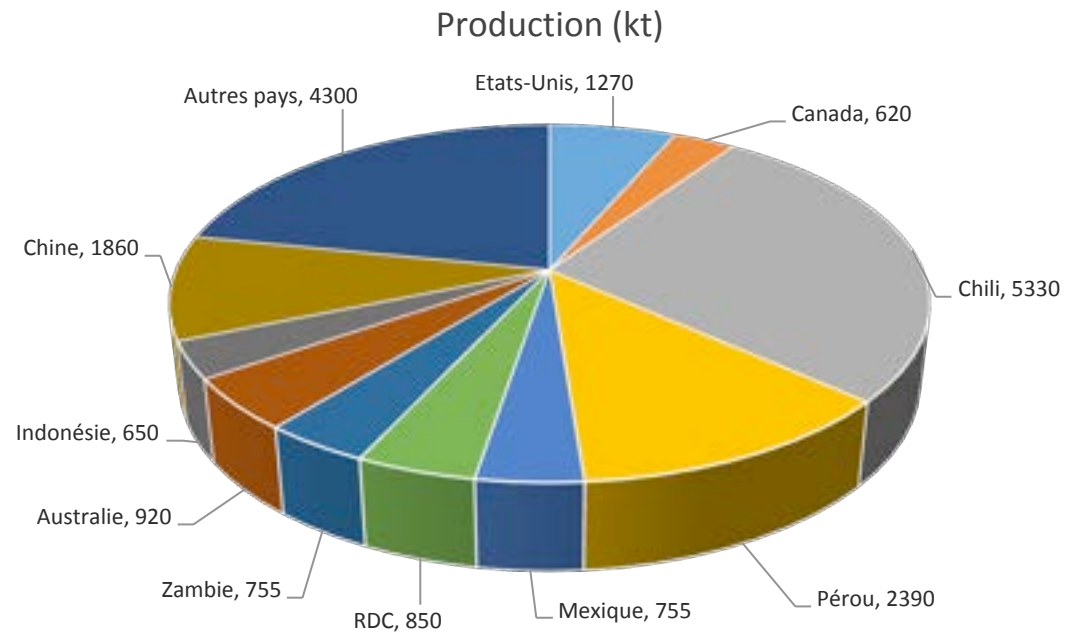
Source : <http://www.besra.com/bau/>



Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

LE CUIVRE

La production en 2017



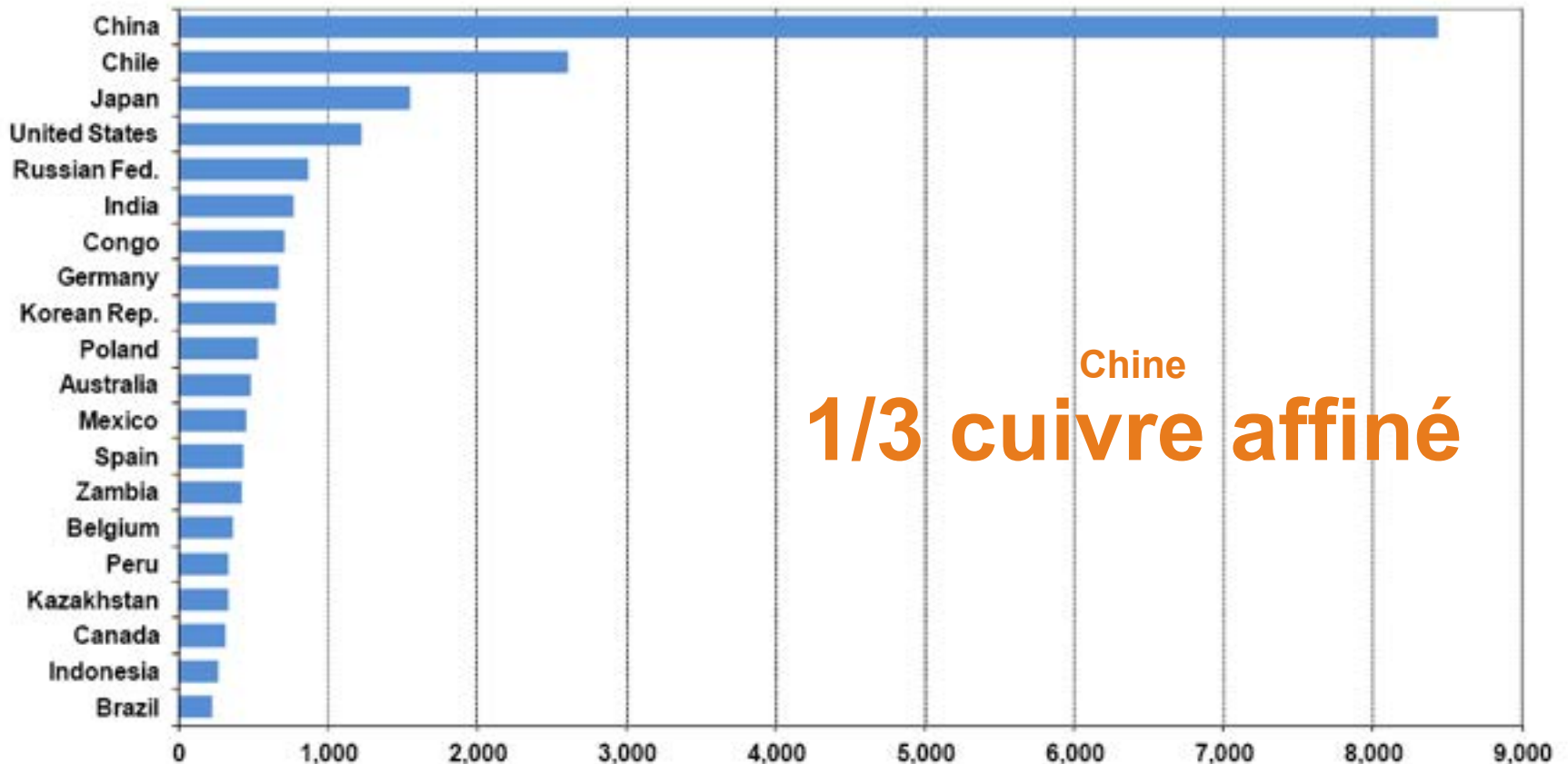
D'après données USGS (2018)

Cuivre natif – Bou N'has mine, Maroc (www.spiriferminerals.com)

Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

Le cuivre

Production de cuivre affiné (2016)



Extrait de International Copper Study Group (2018)

Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

Le cuivre

Principaux flux internationaux de minerais et concentrés de cuivre (2016)

Major Exporters of
Copper Ores and
Concentrates, 2016

1. Chile
2. Peru
3. Indonesia
4. Australia
5. Canada
6. Mexico
7. Mongolia
8. Brazil
9. United States
10. Spain



Major Importers of
Copper Ores and
Concentrates, 2016

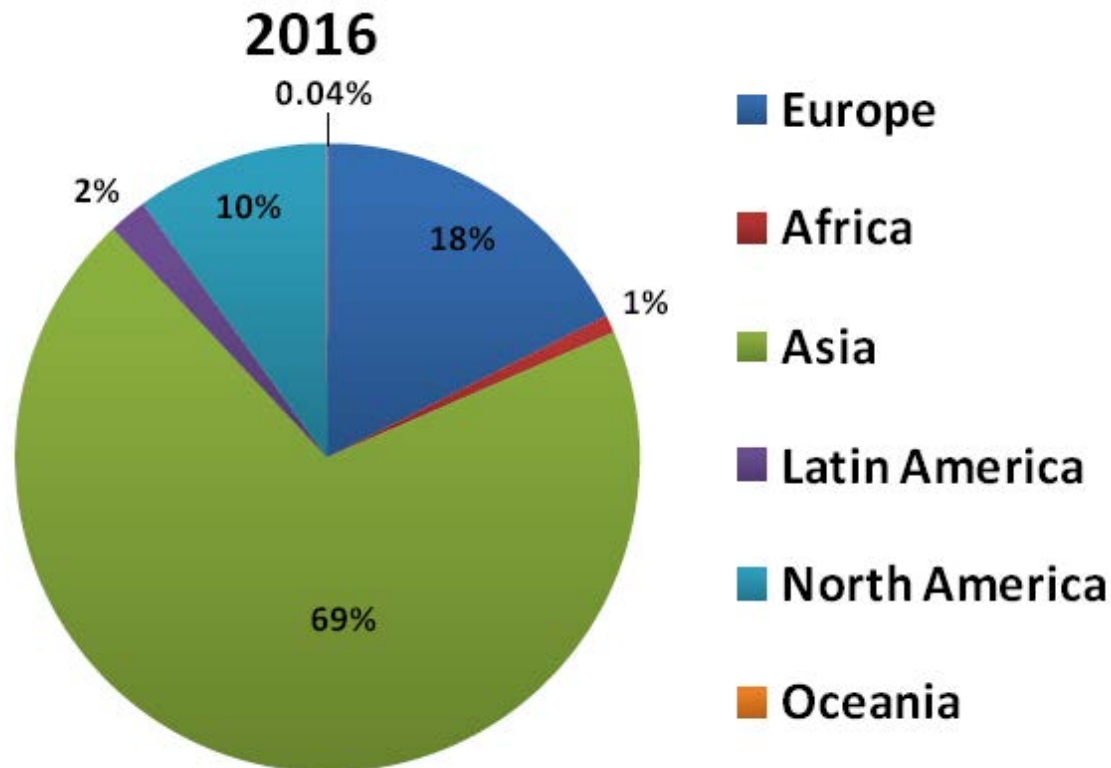
1. China
2. Japan
3. Spain
4. Korean Rep.
5. Germany
6. India
7. Philippines
8. Bulgaria
9. Brazil
10. Russian Fed.

Extrait de International Copper Study Group (2018)

Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

Le cuivre

Principaux utilisateurs de cuivre affiné (2016)



Extrait de International Copper Study Group (2018)

Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

Le cuivre

Copper exploration budgets by country (top 20, US\$ million)

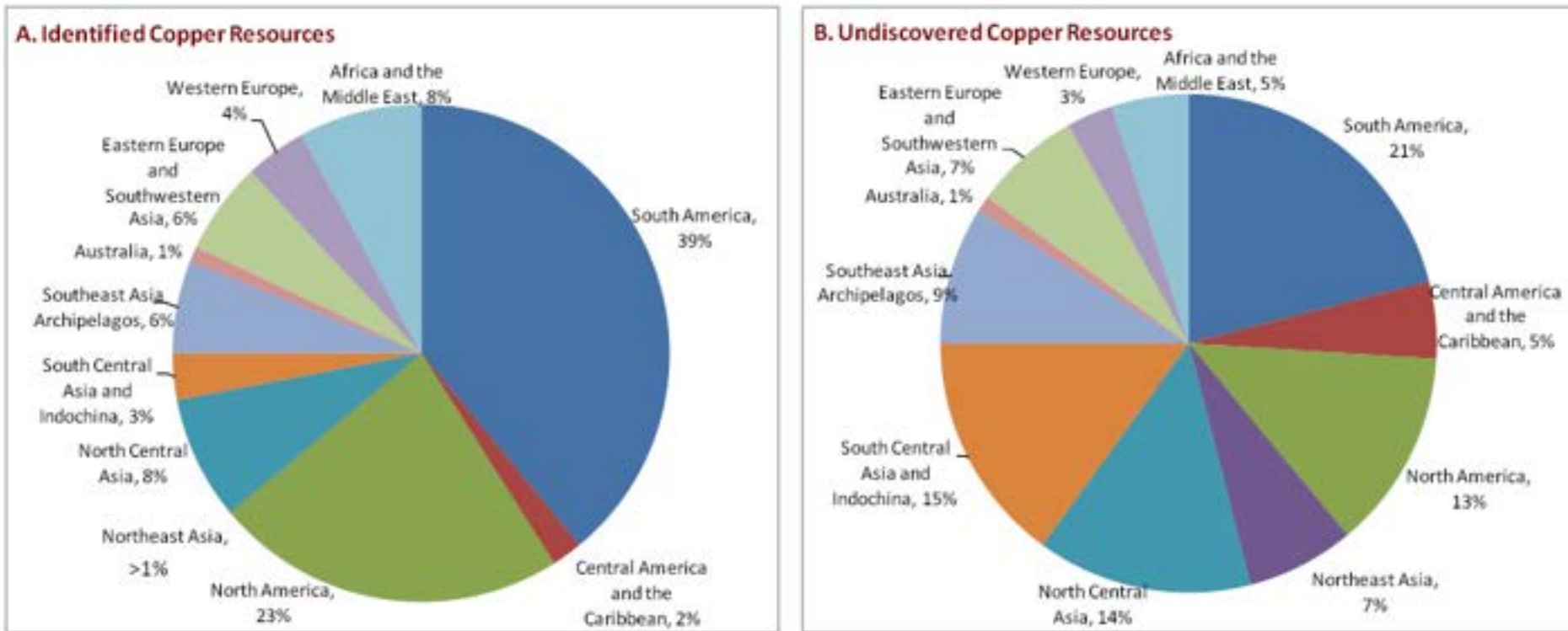
Country	Exploration budget	Global budget share (%)	Companies count (actual)	2017 change from 2016 (%)
Chile	404.4	24.52	41	29.57
Peru	155.5	9.43	36	-1.52
Australia	152.7	9.26	109	2.00
USA	119.8	7.27	39	-2.36
Democratic Republic of the Congo	75.1	4.55	15	-24.45
Brazil	67.2	4.08	9	40.59
China	63.4	3.84	20	5.49
Canada	61	3.70	78	-10.82
Russia	51.2	3.10	8	4.92
Indonesia	50.8	3.08	5	188.64
Papua New Guinea	46.6	2.83	8	-15.12
Mexico	42.5	2.58	15	-4.92
Ecuador	41.8	2.53	10	74.17
Zambia	40.9	2.48	15	0.74
Kazakhstan	37.3	2.26	8	15.48
Serbia	28.1	1.70	5	165.09
Iran	24.7	1.50	2	6.93
Argentina	18.6	1.13	12	-5.58
Sweden	18.1	1.10	4	-15.42
Finland	15.5	0.94	2	84.52
Total	1515.2	91.88	441	

Source: S&P Global Market Intelligence

Extrait de Mining Journal (2018)

Le cycle minier : l'exploration (exemple du cuivre)

Le cuivre



Extrait de International Copper Study Group (2018)

Exemple des terres rares

Les terres rares

- Famille des lanthanides (15 éléments) + Y



Bastnasite sur dolomie – Trimouns, Ariège (Photo L-D Bayle)

TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

Numéro atomique → Z M ← Masse molaire atomique (g.mol⁻¹)
Symbole atomique → X ← Famille
Nom

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1 H Hydrogène																	2 He Hélium
3 Li Lithium	4 Be Béryllium											5 B Bore	6 C Carbone	7 N Azote	8 O Oxygène	9 F Fluor	10 Ne Neon
11 Na Sodium	12 Mg Magnésium											13 Al Aluminium	14 Si Silicium	15 P Phosphore	16 S Soufre	17 Cl Chlore	18 Ar Argon
19 K Potassium	20 Ca Calcium	21 Sc Scandium	22 Ti Titane	23 V Vanadium	24 Cr Chrome	25 Mn Manganèse	26 Fe Fer	27 Co Cobalt	28 Ni Nickel	29 Cu Cuivre	30 Zn Zinc	31 Ga Gallium	32 Ge Germanium	33 As Arsenic	34 Se Sélénium	35 Br Brome	36 Kr Krypton
37 Rb Rubidium	38 Sr Strontium	39 Y Yttrium	40 Zr Zirconium	41 Nb Niobium	42 Mo Molybdène	43 Tc Technétium	44 Ru Ruthénium	45 Rh Rhodium	46 Pd Paladium	47 Ag Argent	48 Cd Cadmium	49 In Indium	50 Sn Étain	51 Sb Antimoine	52 Te Tellure	53 I Iode	54 Xe Xénon
55 Cs Césium	56 Ba Baryum	57 La Lanthane	58 Ce Cérium	59 Pr Praseodyme	60 Nd Néodyme	61 Pm Prométhée	62 Sm Samarium	63 Eu Europium	64 Gd Gadolinium	65 Tb Terbium	66 Dy Dysprosium	67 Ho Holmium	68 Er Erbium	69 Tm Thulium	70 Yb Ytterbium	71 Lu Lutétium	
87 Fr Francium	88 Ra Radium	89 Ac Actinium	90 Th Thorium	91 Pa Protactinium	92 U Uranium	93 Np Neptunium	94 Pu Plutonium	95 Am Americium	96 Cm Curium	97 Bk Berkélium	98 Cf Californium	99 Es Einsteinium	100 Fm Fermium	101 Md Mendelevium	102 No Nébulium	103 Lw Lawrencium	

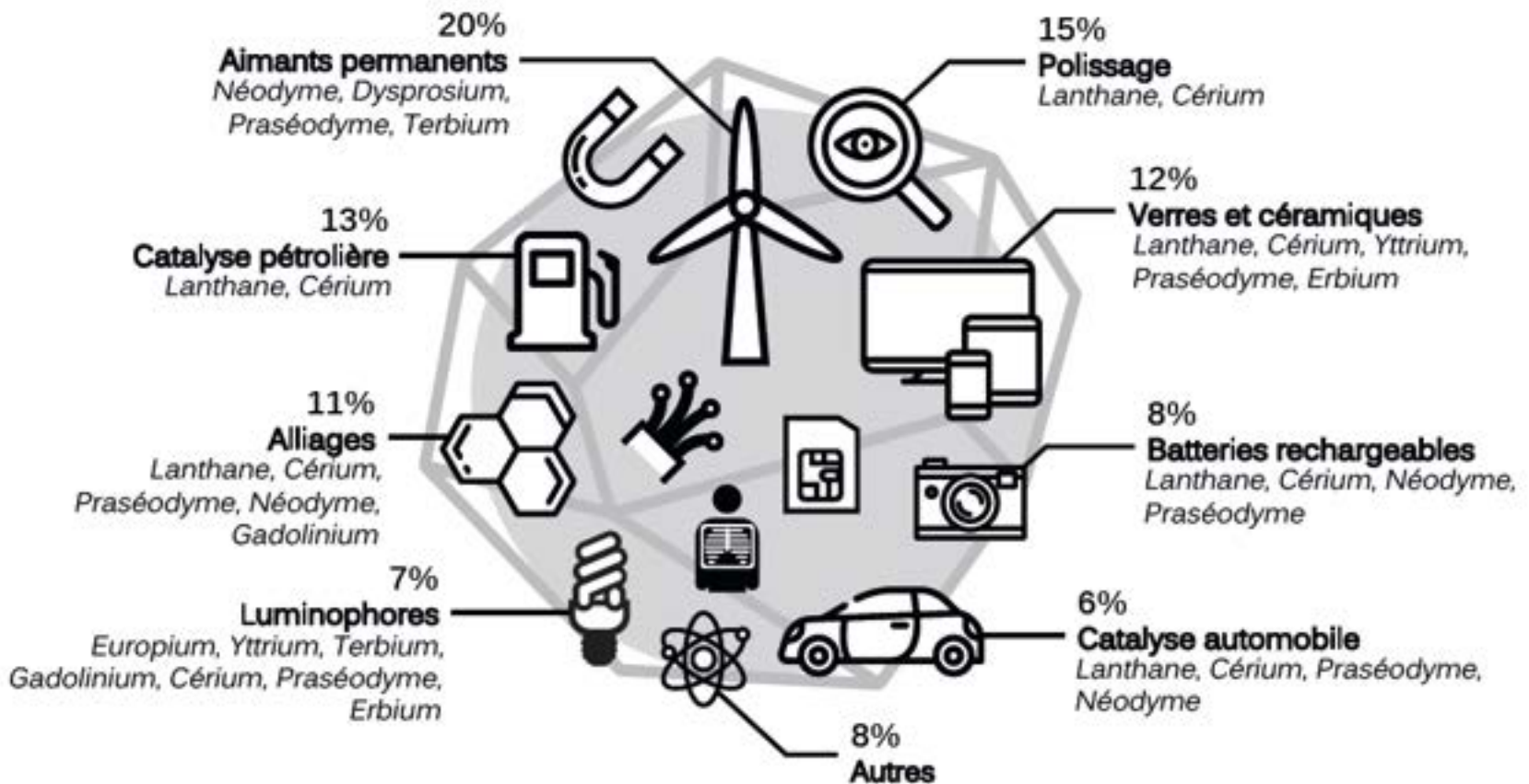
- Propriétés chimiques très similaires
- Concentrations géologiques proches (mais différences terres rares lourdes et légères)

Exemple des terres rares

Les terres rares

- Principales utilisations

Extrait de « dossier enjeux des Géosciences - BRGM (2017) »



Exemple des terres rares

Les terres rares

- Principales utilisations dans le secteur de la défense

Samarium	Néodyme	Yttrium	Dysprosium	Terbium	Europium	Lanthane	Lutécium
Aimants de missiles; Aimants permanents, motorisation électrique, drones	Bombes, Lasers, motorisation électrique, radars, sonars, capteurs, disques durs, batteries hybrides, guidage de missiles.	Fuselage de chasseurs, radars, satellites, affichage, éclairage, radars, sonars, capteurs.	Aimants permanents, motorisation électrique, système de vidéo, guidage de missiles	Aimants permanents, affichage, éclairage, motorisation électrique, guidage de missile	Fibres optiques, affichage, éclairage, radars, sonars, capteurs, disques durs, lasers	radars, sonars, capteurs	radars, sonars, capteurs
  	  	  	  	  	  	  	  

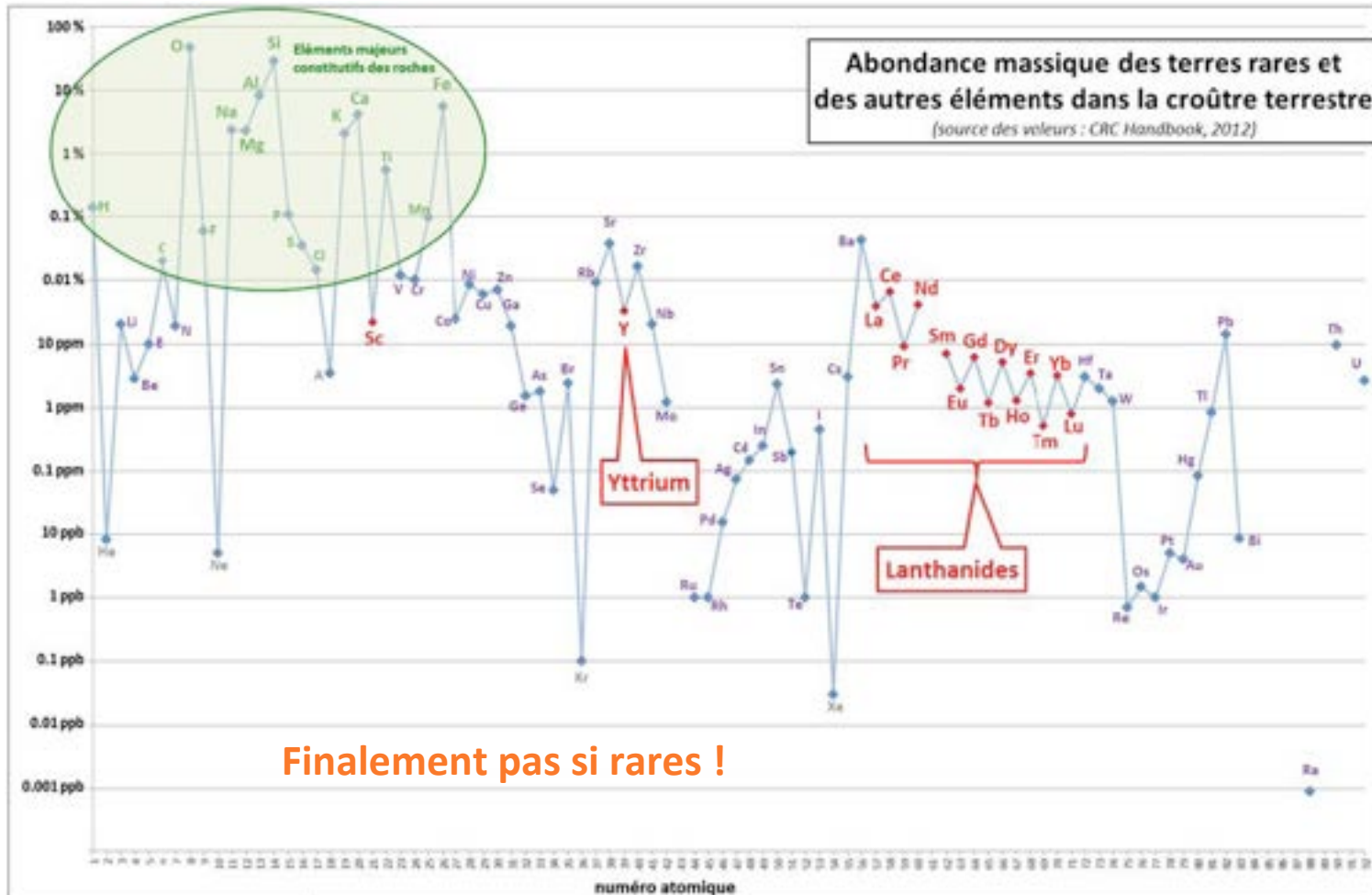
<http://blogs.egc.fr/terres-rares/>

Exemple des terres rares

Les terres rares

- Abondances naturelles

Extrait de Labbé & Lefebvre (2016)



Exemple des terres rares

Les terres rares : gîtologie

Généralement des teneurs de l'ordre d'au moins 1 % (sauf argiles à $\approx 0,3\%$)

- **Principaux gisements**

Gîtes primaires d'origine magmatique :

- Associés aux carbonatites
- Associés aux magmatismes alcalins (contexte anorogénique et d'extension)

Gîtes secondaires associés aux processus supergènes :

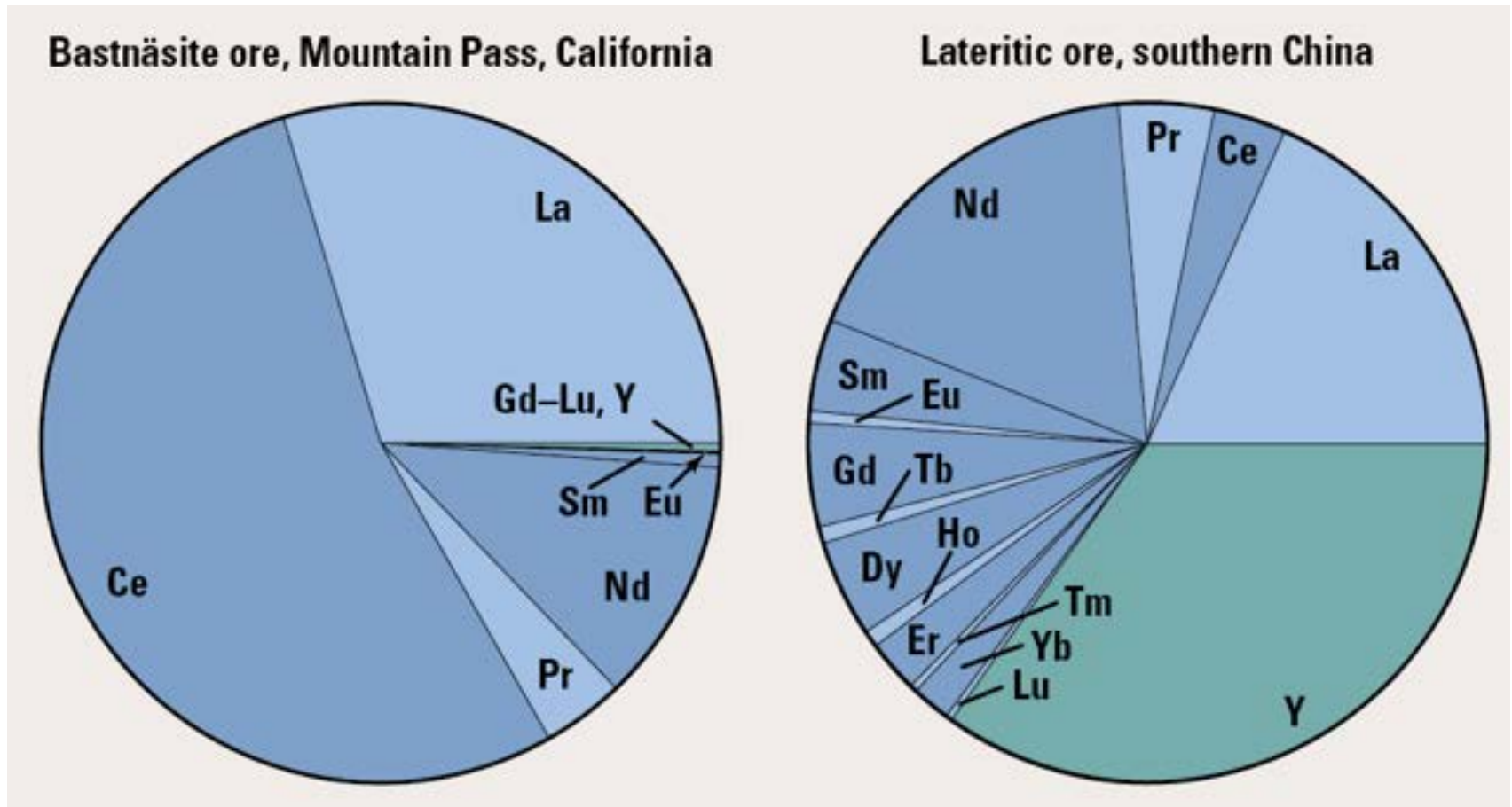
- Placers à minéraux lourds (monazite et xénotime)
- Argiles « ioniques » issus de l'altération de roches intrusives peralumineuses préenrichies (sud-est asiatique).

Paramètres importants :

- présence de terres rares lourdes (+ éventuels valorisables Zr et/ou Nb)
- absence d'uranium

Exemple des terres rares

Les terres rares : minéralogie

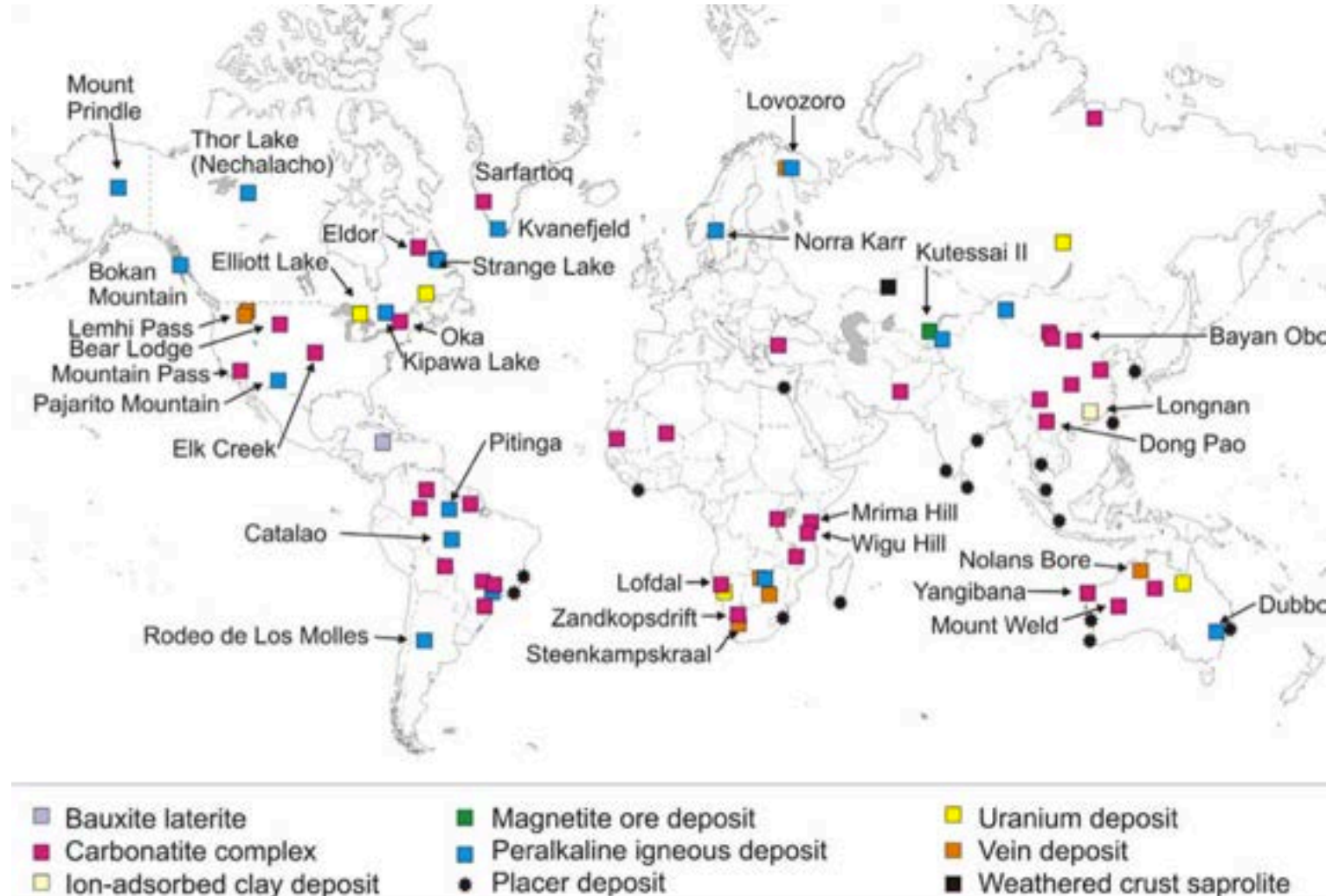


Comparaison des proportions de différentes terres rares entre la bastnäsite et les argiles ioniques chinoises - D'après USGS

Exemple des terres rares

Les terres rares : les principaux gisements

Source : USGS

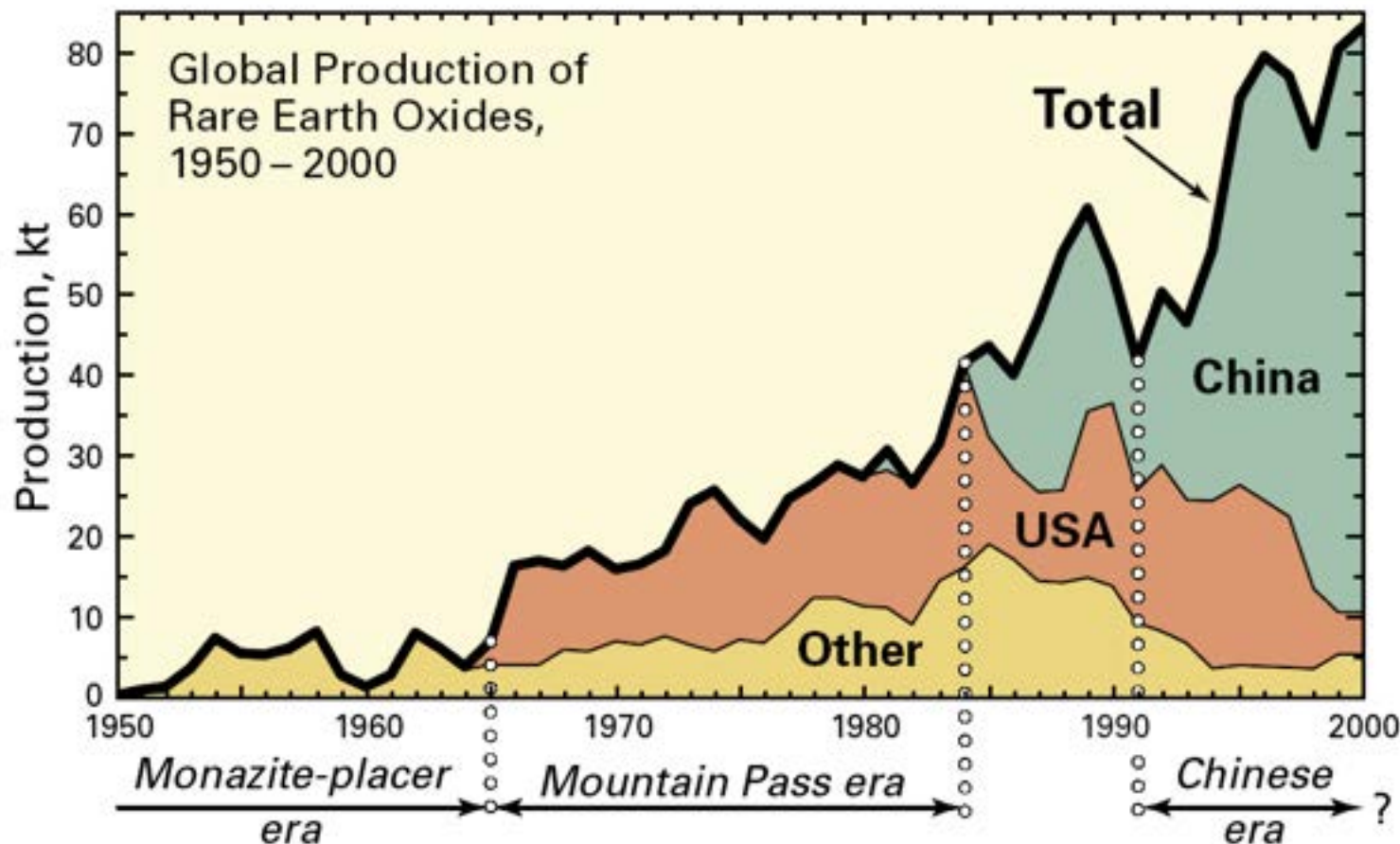


Exemple des terres rares

Les terres rares : Production

Problématique de la domination chinoise

D'après USGS



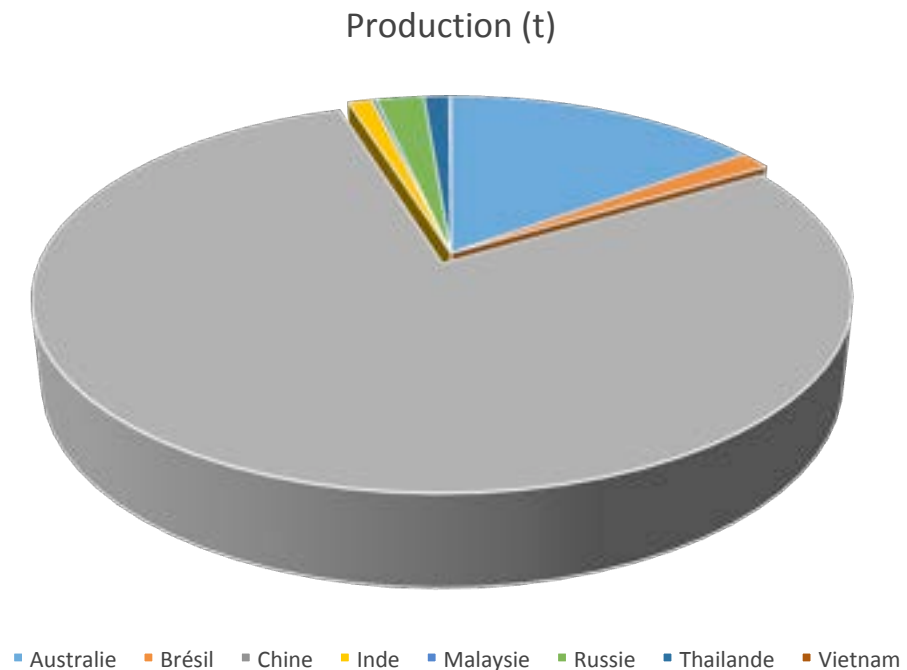
Exemple des terres rares

Les terres rares : Production

Problématique de la domination chinoise

Mise en place de quota d'exportation

Contrainte sur les prix

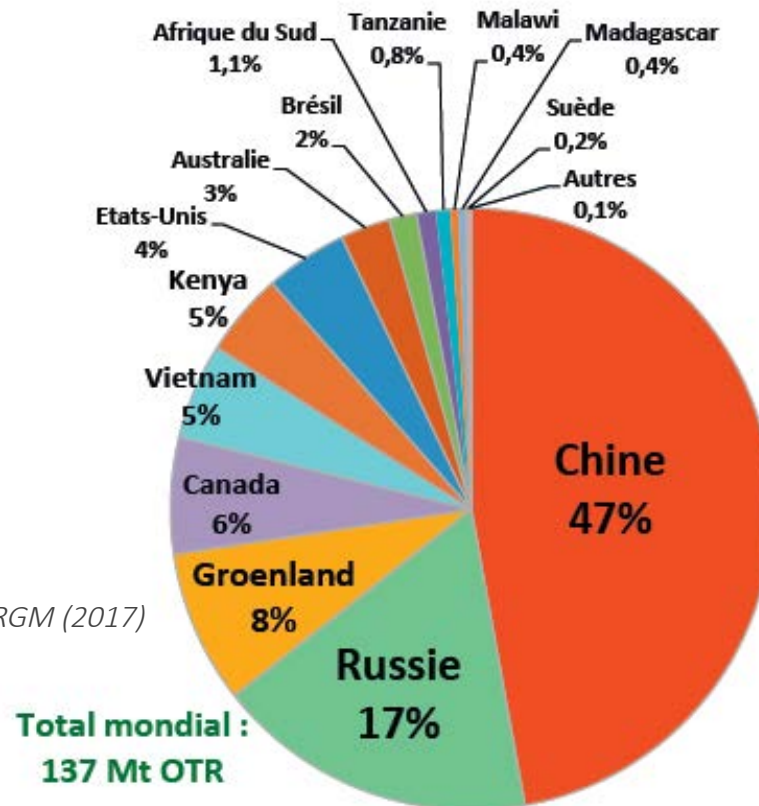


Exemple des terres rares

Les terres rares : Ressources

Répartition des ressources en terres rares - hypothèse basse 2015

(sources mixées SNL, TMR, Roskill, 2015)

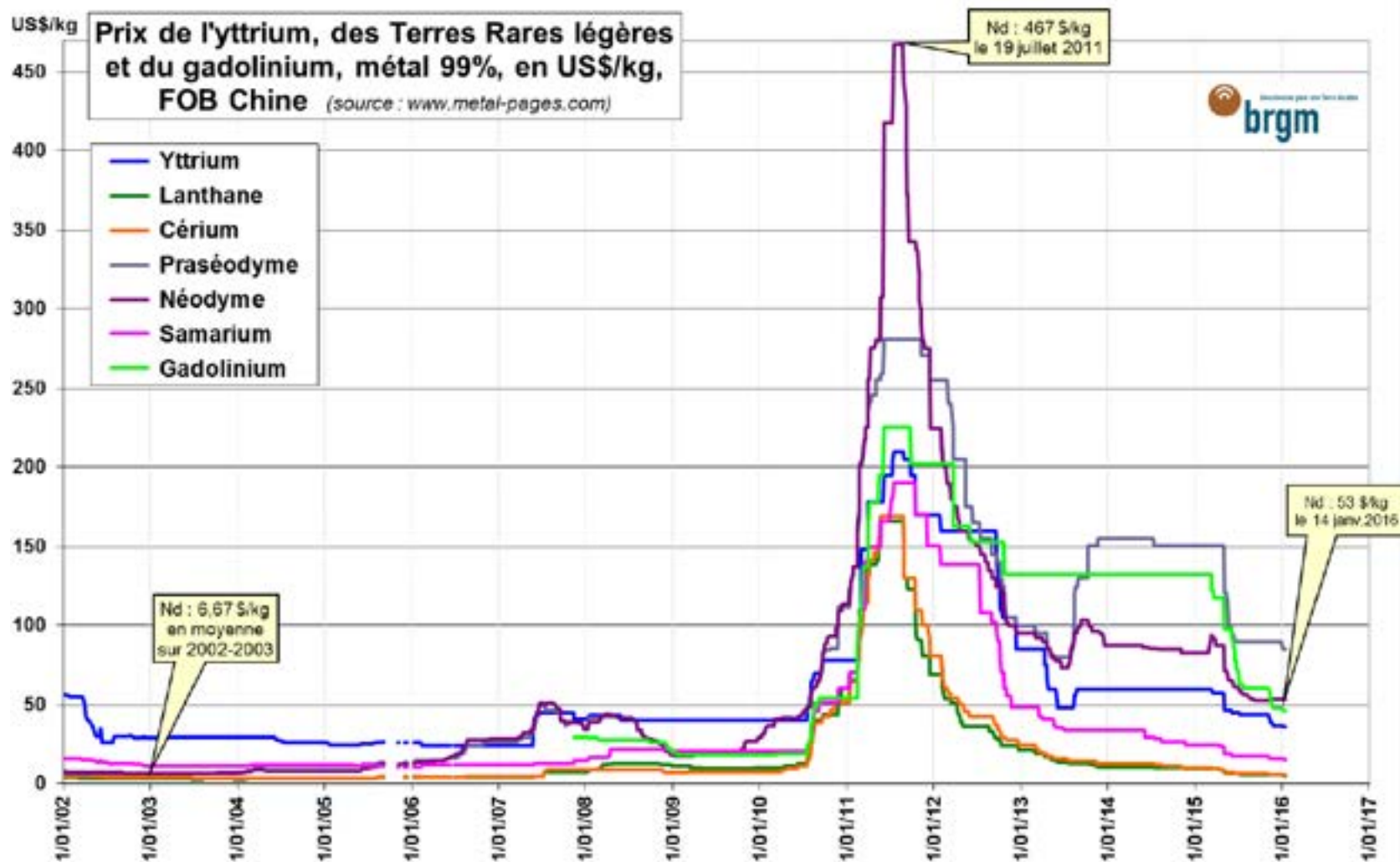


Extrait de « dossier enjeux des Géosciences - BRGM (2017) »

Exemple des terres rares

Les terres rares : Evolution des prix

Extrait de Labbé & Lefebvre (2016)



Exemple des terres rares

Les terres rares : Conditions de production ?



Mine de Bayan Obo (Chine) - Extrait de <http://ceramics.org>

Exemple des terres rares

Les terres rares : Conditions de production ?



Vue sur les usines d'affinage de Baotou (Chine) – Source : <http://veroniquedeviguerie.com>

Conclusions

La transition énergétique aura un impact sur les besoins en certains métaux.

Le recyclage n'est pas suffisant pour répondre à la demande dans une perspective de croissance continue de celle-ci.

Exemple du cuivre

- Plusieurs types de gisements mais domination d'un type
- Production dominée par l'Amérique latine (gisements de type porphyres) mais relativement bien répartie
- Exploration en croissance. Utilisation des connaissances gîtologiques et métallogéniques
- Exploitation : mines à ciel ouverts de très grandes tailles
- Impact le plus important => drainage minier acide (sulfures)

Conclusions

Exemple des terres rares :

- Production très localisée (Chine)
- Mais évolution avec quelques projets à l'extérieur
- Principaux gisements : magmatisme alcalin, carbonatite, placers et argiles ioniques
- Importance de la présence du « cocktail », notamment des terres rares lourdes

POUR PLUS D'INFORMATIONS

Livre blanc sur la mine responsable

<http://www.mineralinfo.fr/actualites/publication-collection-mine-en-france>

Et plus généralement site <http://www.mineralinfo.fr/>

Accueil



▶ POLITIQUES PUBLIQUES ▶ ACTEURS ▶ MATIÈRES PREMIÈRES ▶ MINES ET CARRIÈRES ▶ CARTES ET DONNÉES ▶ POUR COMPRENDRE

Matières premières minérales primaires et secondaires non énergétiques

Ressources naturelles et recyclées pour satisfaire des besoins essentiels de la société.