



COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

CHAIRE DÉVELOPPEMENT DURABLE — ENVIRONNEMENT, ÉNERGIE ET SOCIÉTÉ

Année académique 2014-2015

Pr Georges Calas

Jeudi 22 janvier 2015

Les ressources minérales, bases
de notre civilisation: des défis
majeurs pour le XXI^e siècle

Chaire créée avec le soutien de 



Mine de nickel de Tiébaghi, Nouvelle-Calédonie

© SLN, Nouméa

Les ressources naturelles

Ressources énergétiques



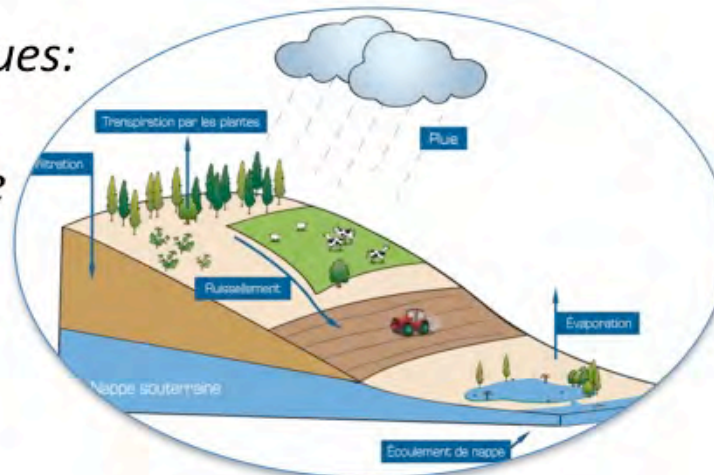
Ressources minérales



Biodiversité



*Milieus physiques:
eau, sols,
atmosphère*



Ressources alimentaires

Les ressources minérales



Du diamant au granite...

... les prix varient de 7-9 ordres de grandeur.

Les ressources minérales

Matériaux de construction



Minerais pour "petits métaux" & métaux "stratégiques"

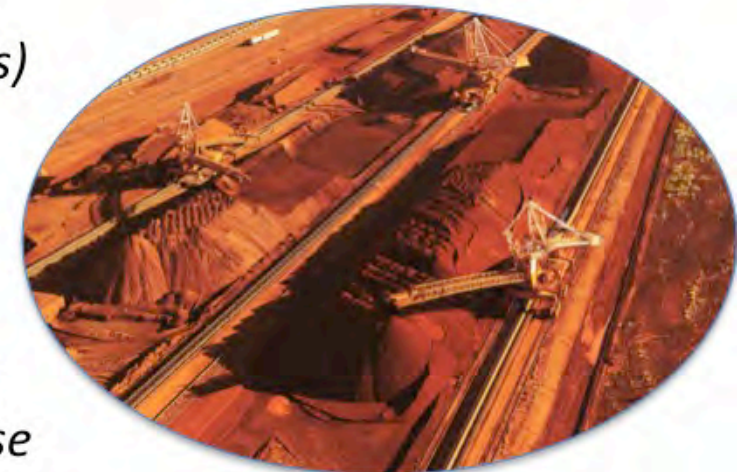
Minéraux industriels (papier, plastiques...)



Matières premières (verres, céramiques, ciments)



Minerais pour métaux de base

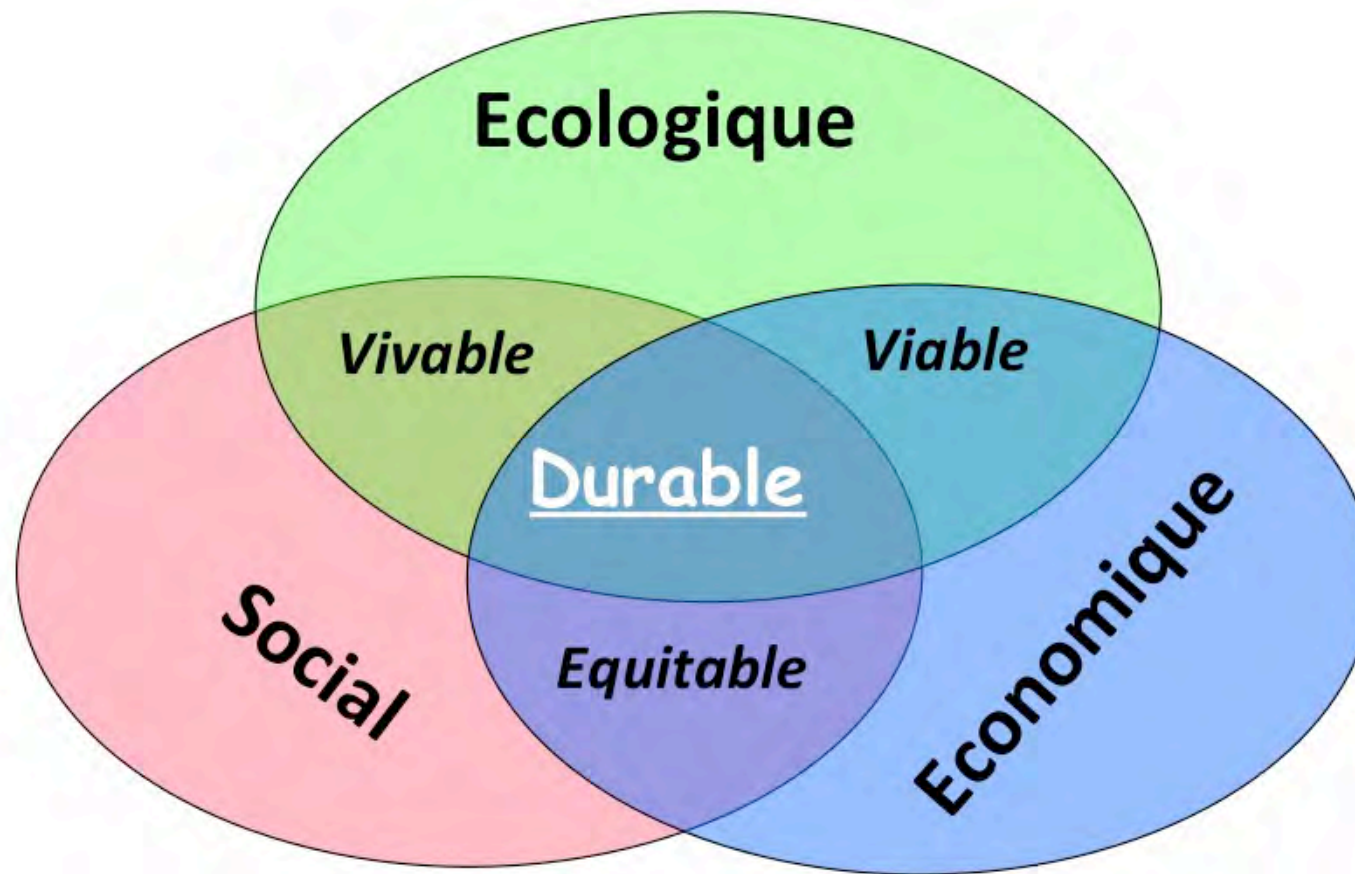


Les ressources minérales

Activité minière

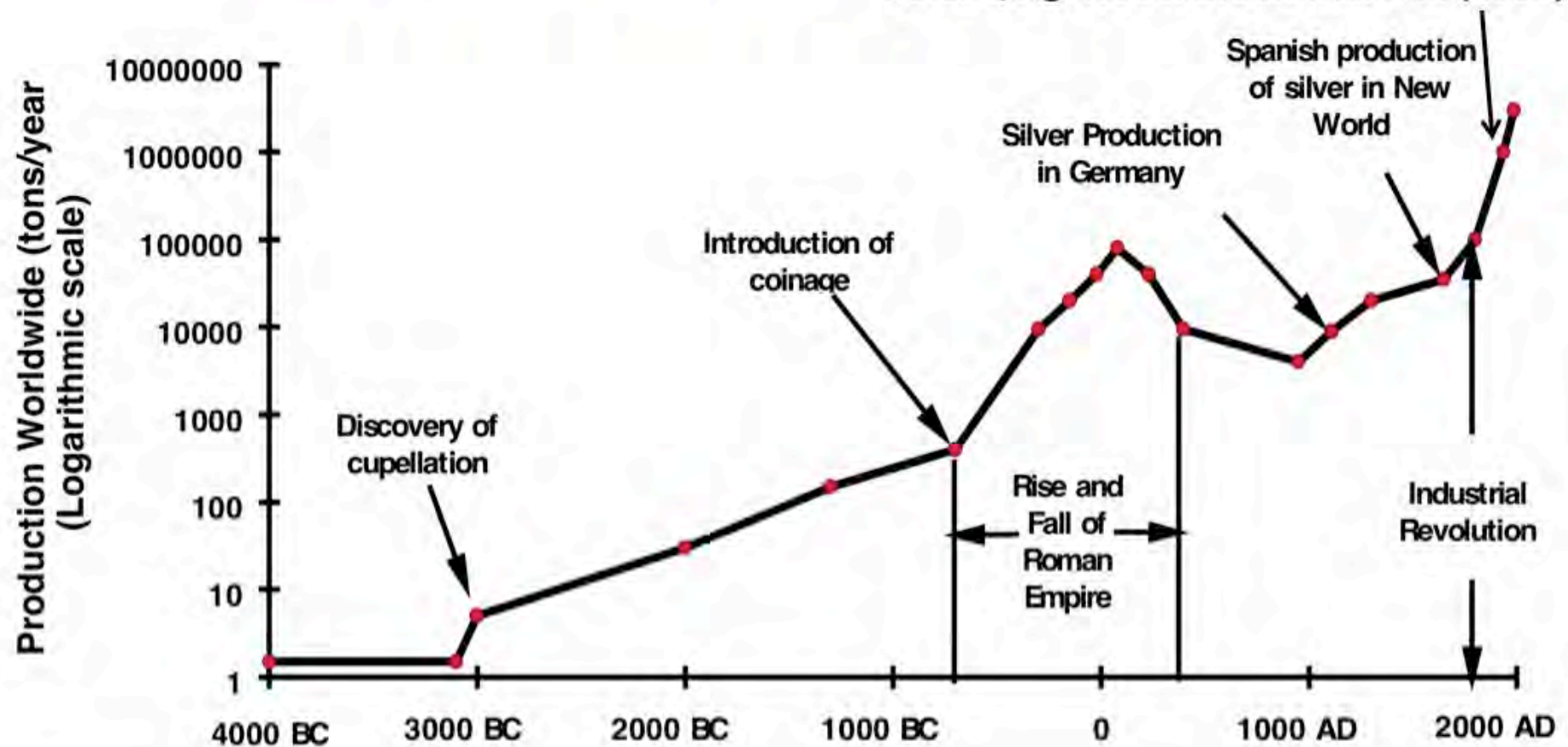


Le questionnement: développement durable.



1. Les leçons de l'Histoire

Galène/Ag: Nobel Braun-Marconi (1909)



Production mondiale de plomb depuis 6 millénaires (Hilts, 2001).

Depuis l'aube de l'humanité...



*Biface de St Acheul
-500 000/-300 000 ans*



*Pigments naturels (oxydes Fe, Mn)
Grotte de Lascaux, environ -18 000 ans:*



*Collier de phosphate (variscite)
Carnac -4500/-2000 ans*

... marquant l'Histoire des peuples...



*Casque gaulois
Site d'Alésia
1er siècle av-JC.*



*Bracelets, Sainte-Colombe/Seine
500 ans av-JC.*



Applique en bronze, Batilly-en-Gâtinais, 200 ans av-JC.

*Extraction d'or en Espagne et Gaule:
environ 6500 kg d'or par an...*

... les ressources minérales sont utilisées dans leur diversité...

Matériaux de construction
Antiques de Glanum, Saint Rémy de
Provence, 25-10 avant J.-C.



Matières premières: fabrication du vitrail,
Chartres, vers 1180.

...avec des mythes bien ancrés dans les mémoires.



(Annaberg Altar, 1522)

*Un endroit fondateur :
les Monts Métalliques (Saxe).
Kupfernicker, Kobolden, Marie Curie...*



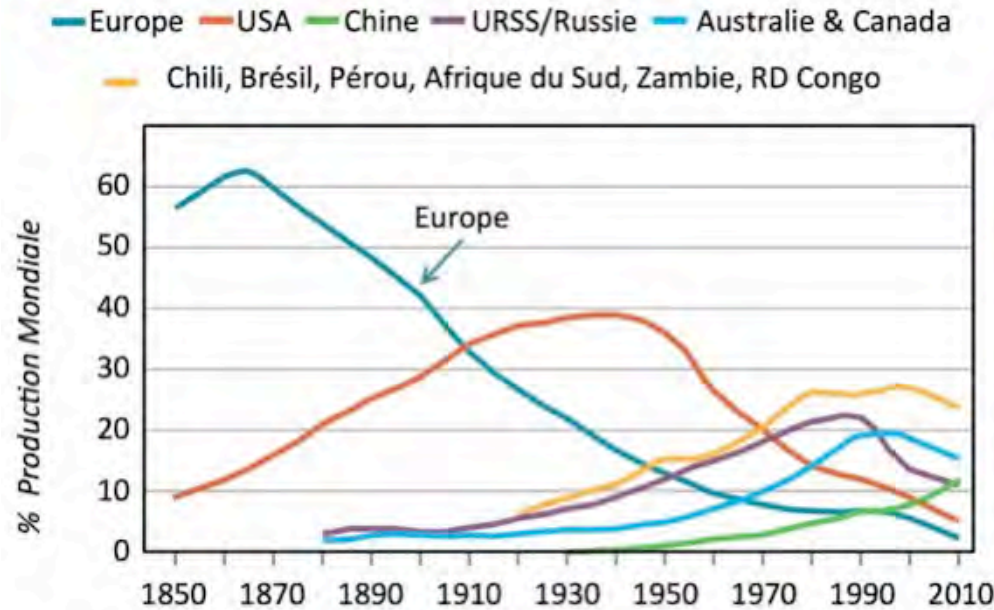
Jason et la Toison d'or



Californie 1849: "Mother Lode"

*Sans oublier les populations décimées
(mines du Potosi, goulags de Noril'sk
et Kolyma...)*

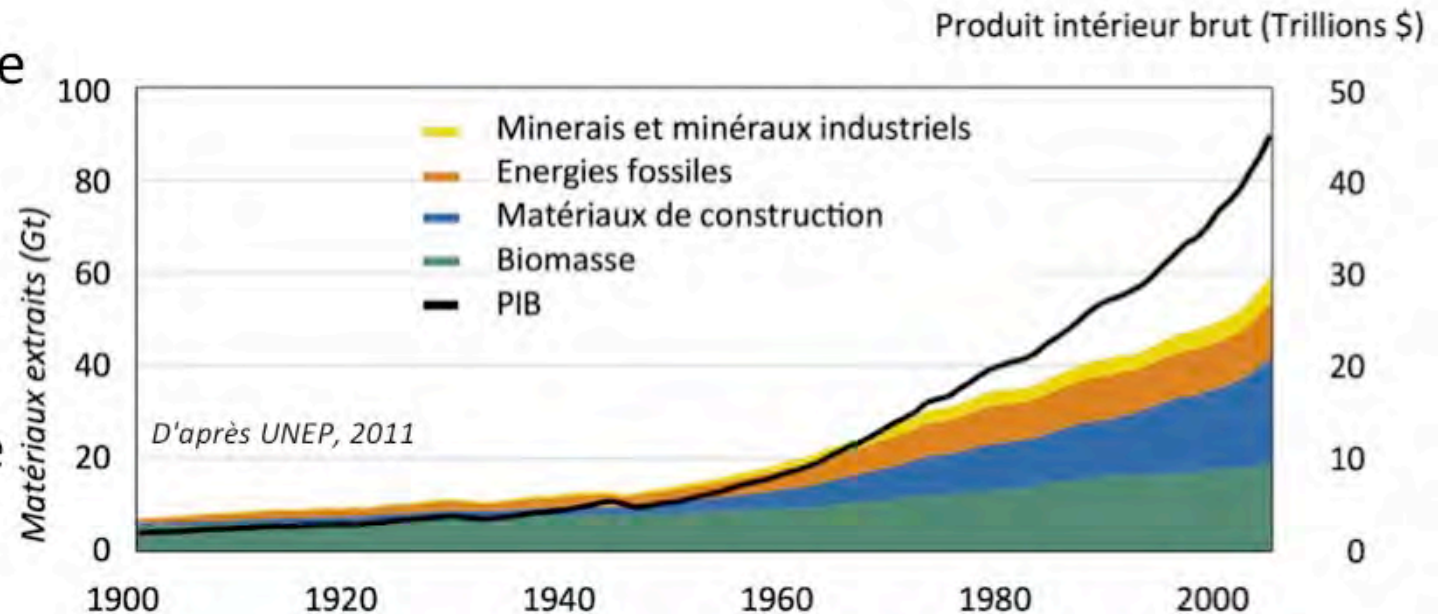
L'exploitation des ressources évolue



Baisse de l'exploitation minière en Europe...

D'après ICMM, 2012

...dans un contexte d'augmentation des quantités extraites, posant ainsi la question de la durabilité de la ressource.

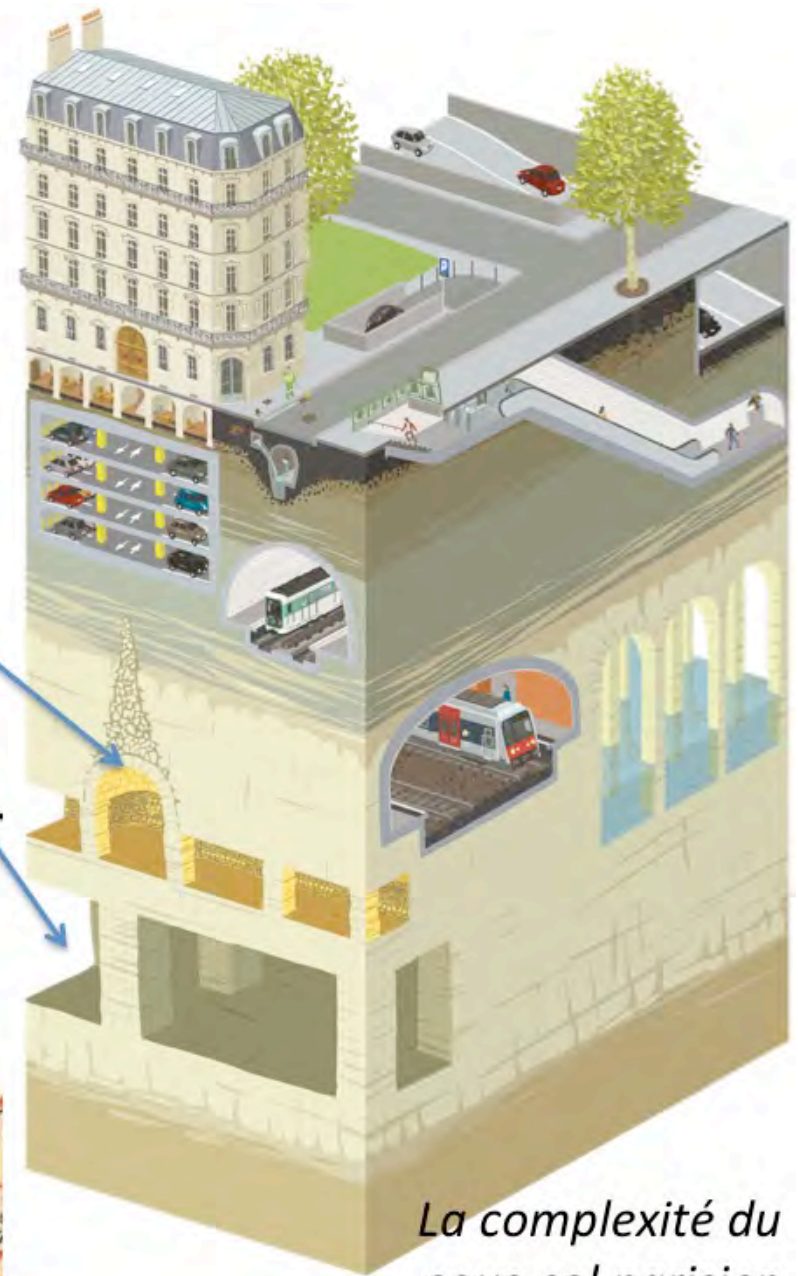


Penser au futur

Exploitations souterraines (2D)
sous Paris pour extraire les
pierres de construction: le passé
n'avait pas anticipé le futur?

Ligne 12 et carrières souterraines

pieux



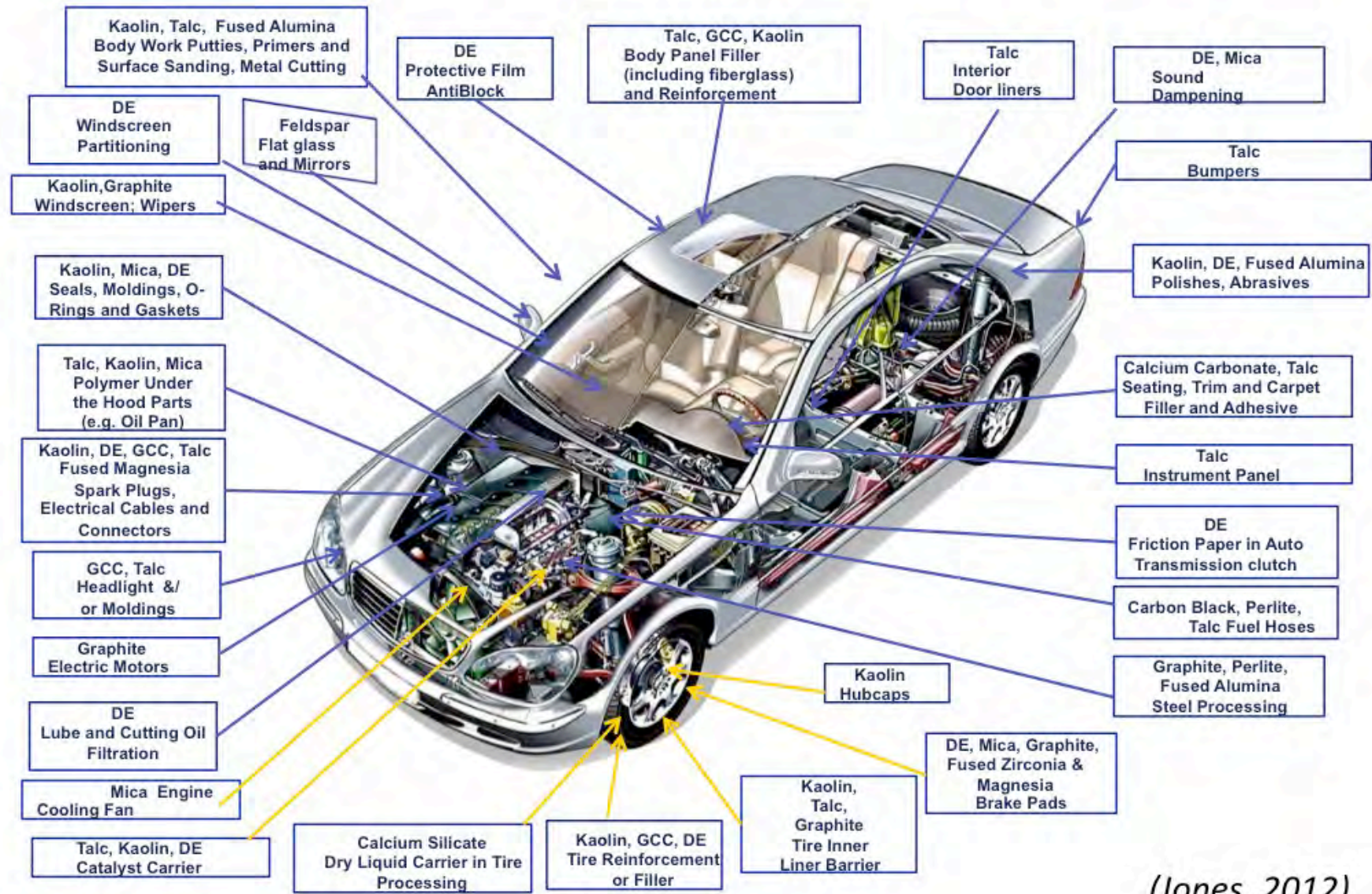
Tour Montparnasse

2. Importance et actualité des matières premières minérales



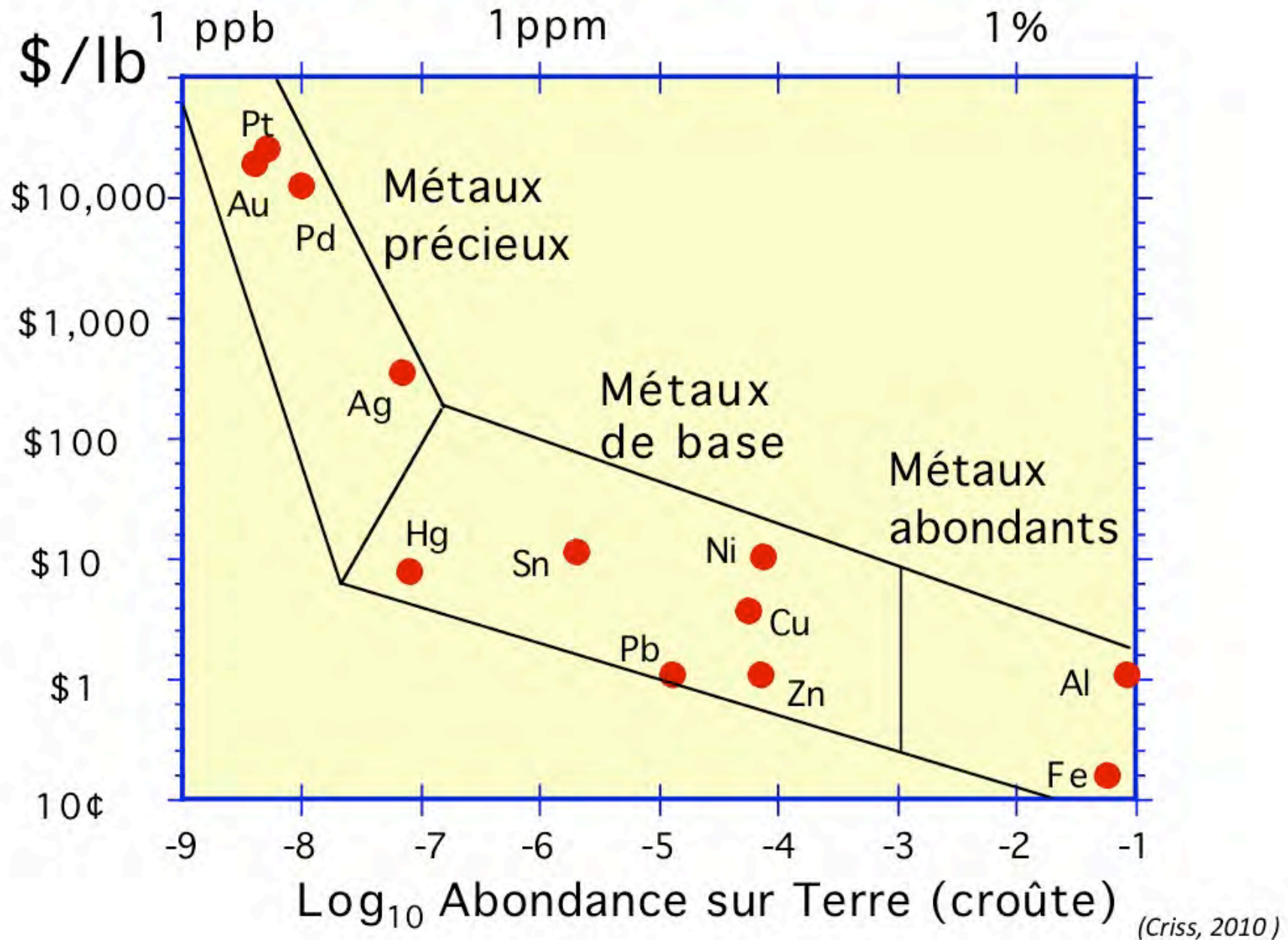
(Elements, 2014)

Des minéraux, dans la vie de tous les jours



(Jones, 2012)

Des métaux de valeur différente



Des ressources mal partagées

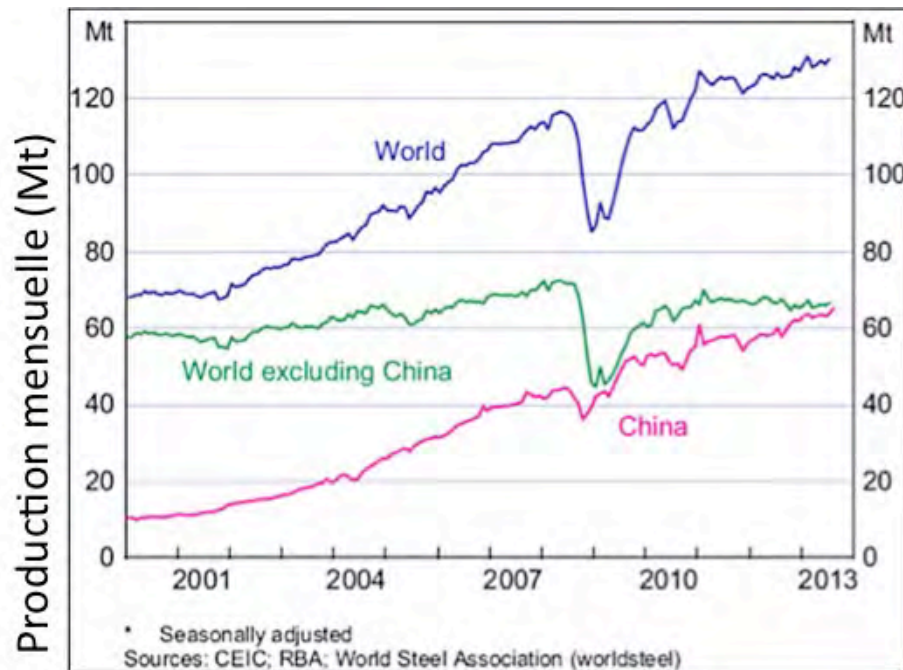


*Production de platine
(192 t)*



*Réserves de platinoïdes
(66 000 t)*

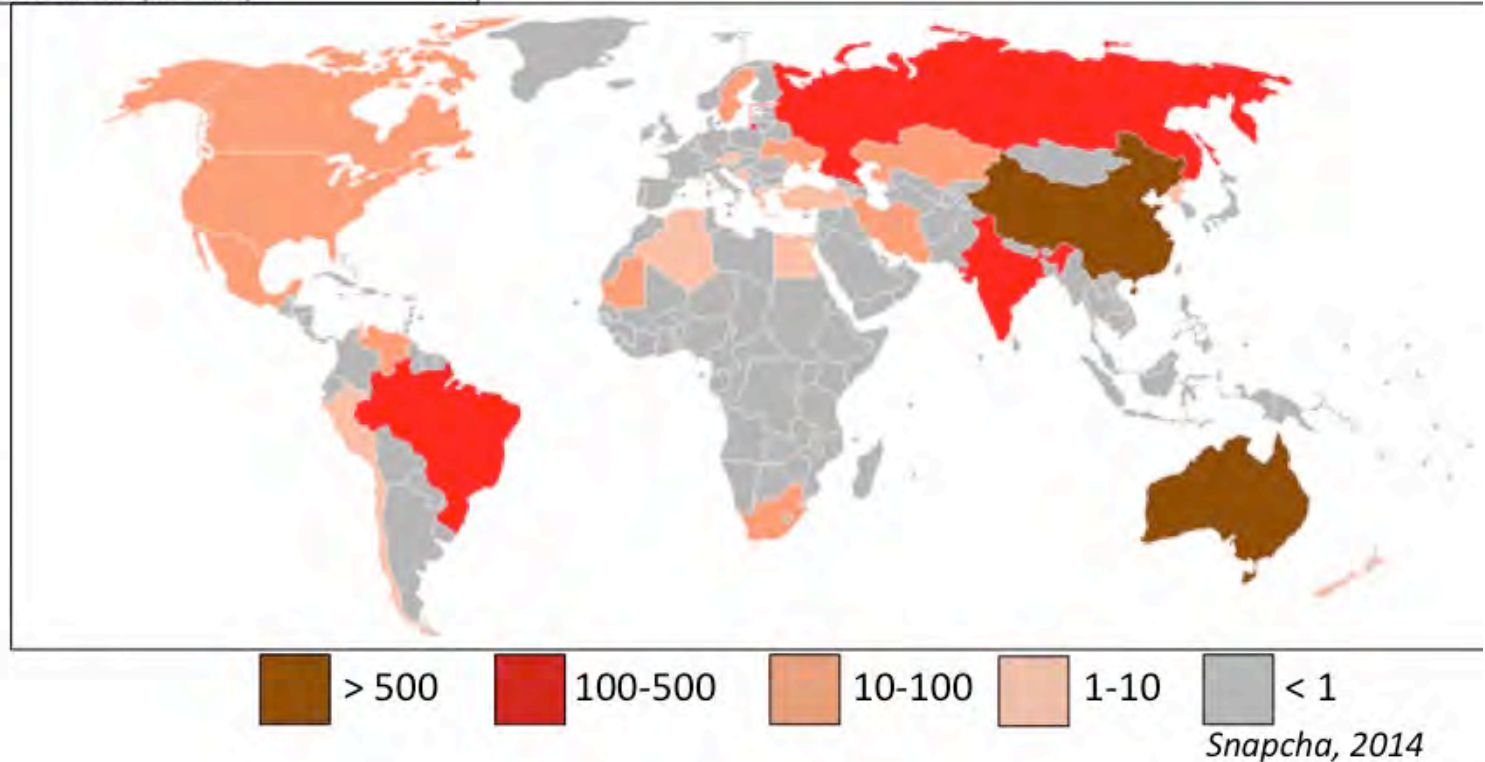
*Niobium : mine d'Araxa (Brésil: 75% prod. mondiale)
Terres rares : mine de Bayan Obo (Chine: 45% prod. mondiale)*



Le début du 21^{ème} siècle: montée en puissance de la Chine

Production d'acier

Production de
minerai de fer
(Mt: 2008)



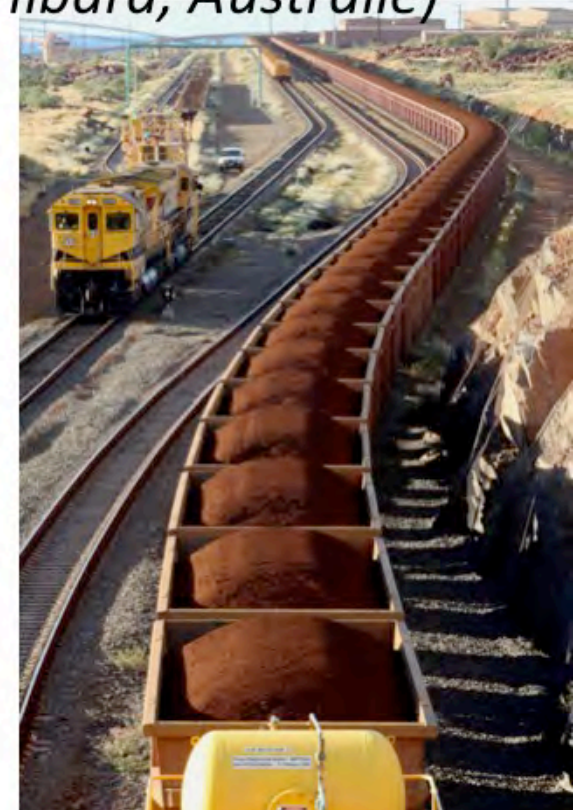


Exploitation du minerai de fer (Pilbara, Australie)

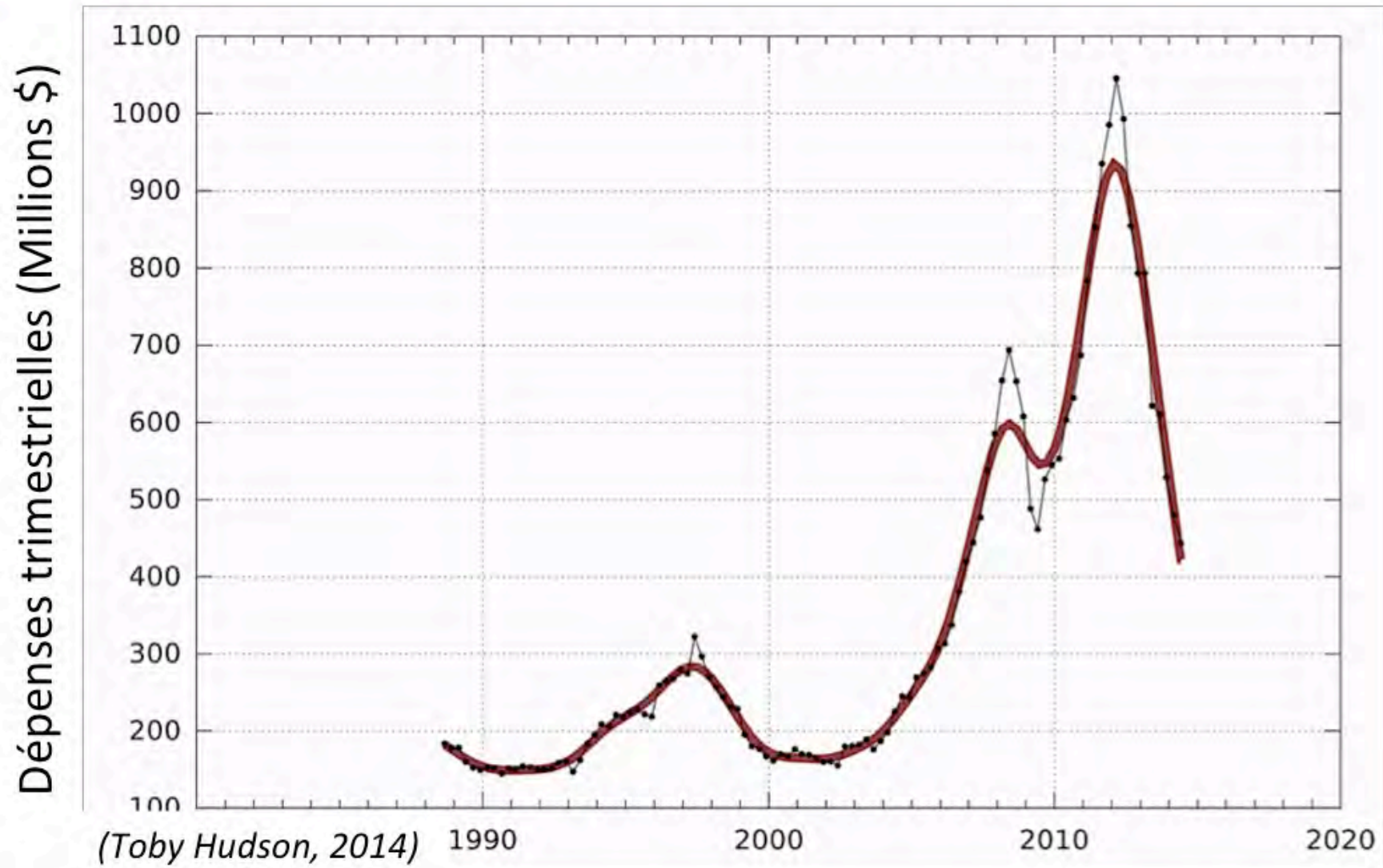
Mine, métallurgie, négoce: une intégration verticale...



Usine de la SLN à Doniambo (Nouméa)



Une conjoncture qui se retourne rapidement.

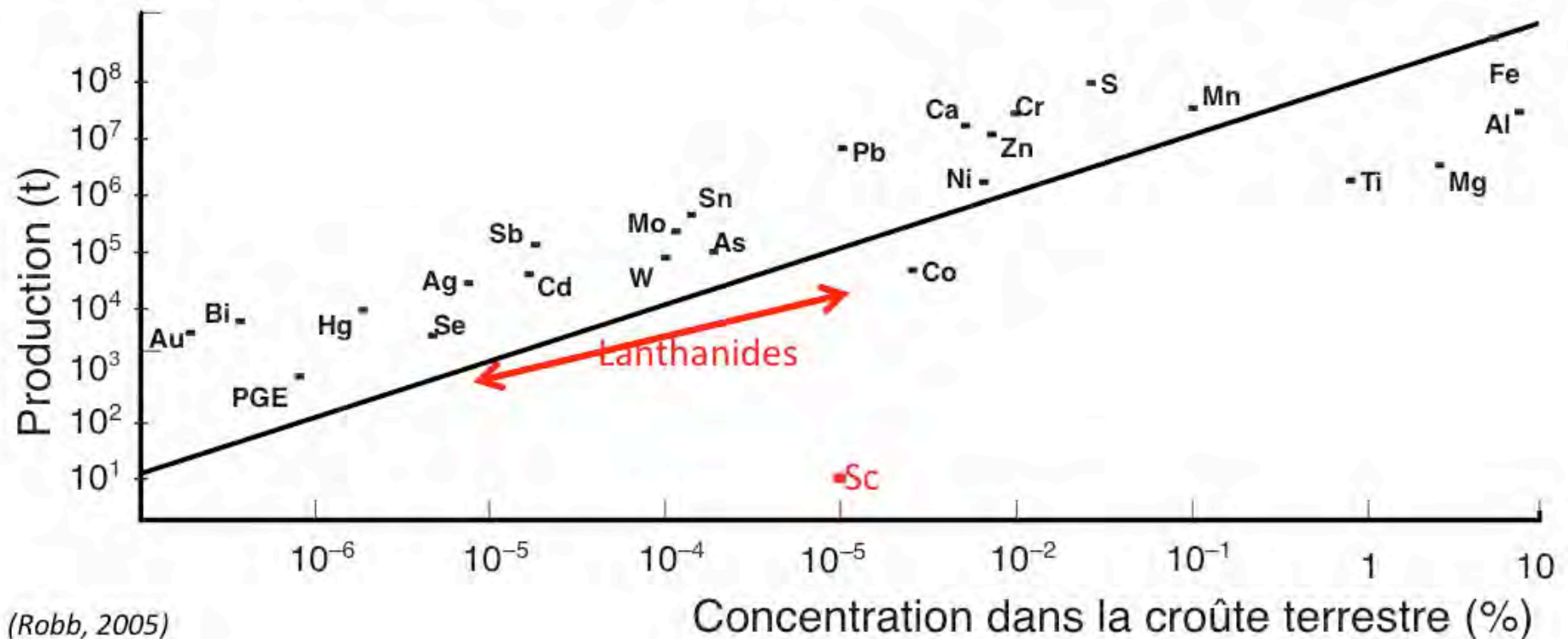


Dépenses d'exploration de minerai de fer en W-Australie

Des ressources exploitées selon leur abondance

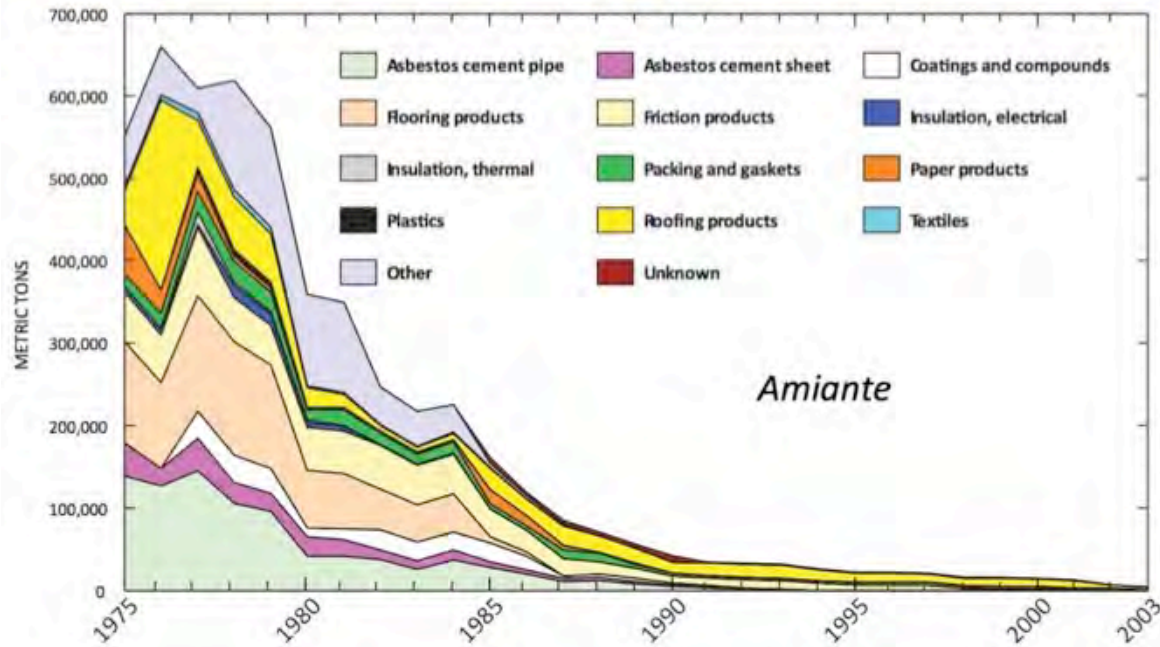
Les métaux doivent être en concentration suffisante pour être exploitables: des teneurs qui peuvent être plus de 1000 fois supérieures aux concentrations naturelles (Au, Sn...).

Les quantités extraites sont cohérentes avec les concentrations moyennes observées dans la croûte terrestre.

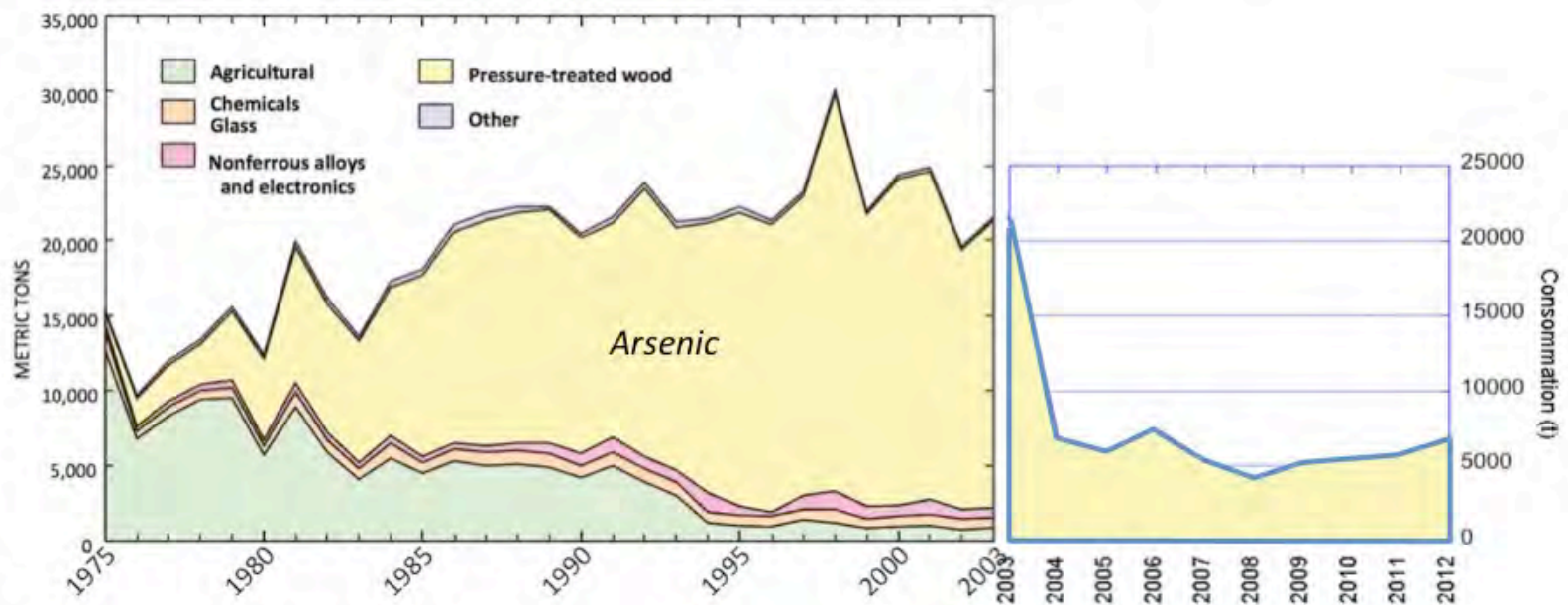


(Robb, 2005)

Impact de la réglementation: amiante, arsenic.



2003: abandon du traitement du bois avec des produits arséniés.



(USGS, 2011)

3. Qualité et variabilité : le cas exemplaire des minéraux industriels



Plage



Sable de quartz

Sol latéritique

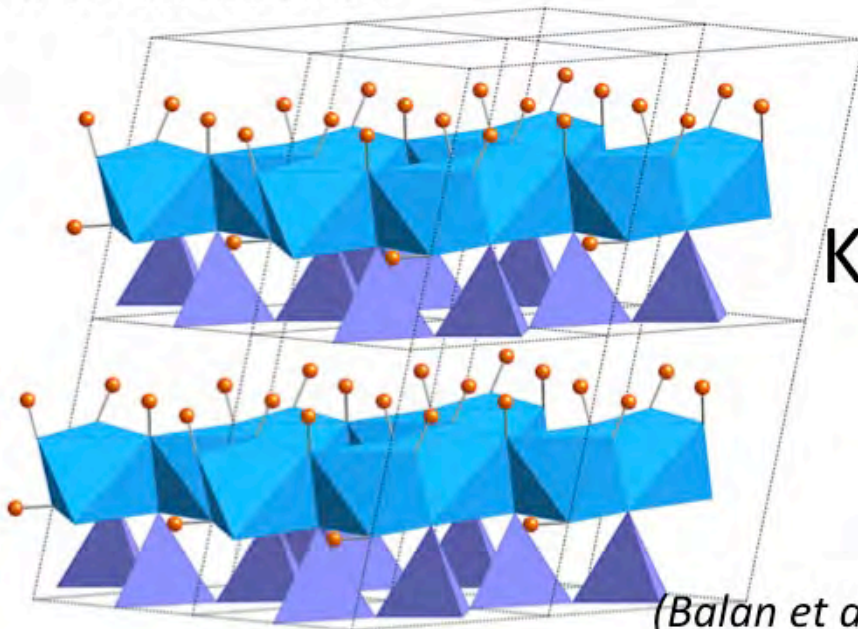


Kaolin

Les minéraux argileux

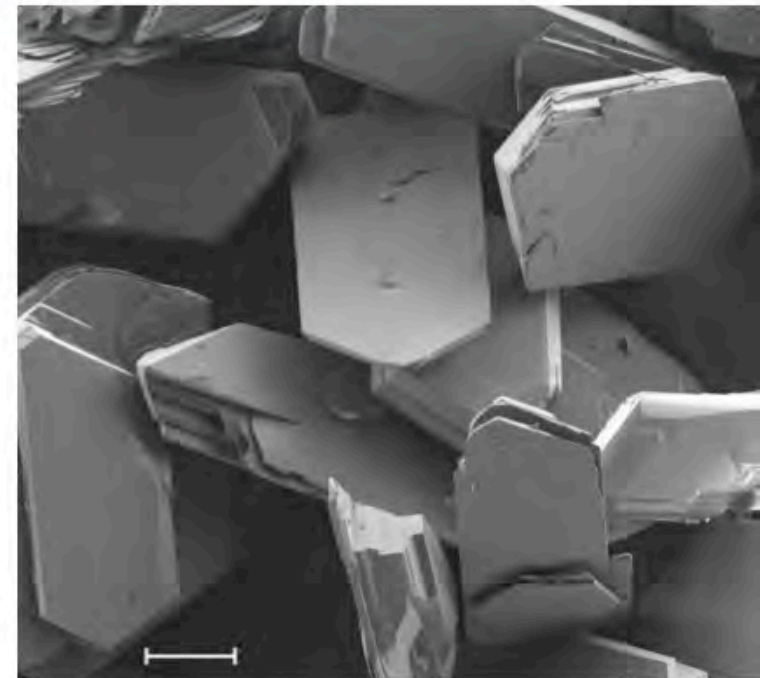
Les argiles, matériaux utilisés de tout temps.

Sous le même nom de minéral : des qualités, des usages et des valeurs très différents.

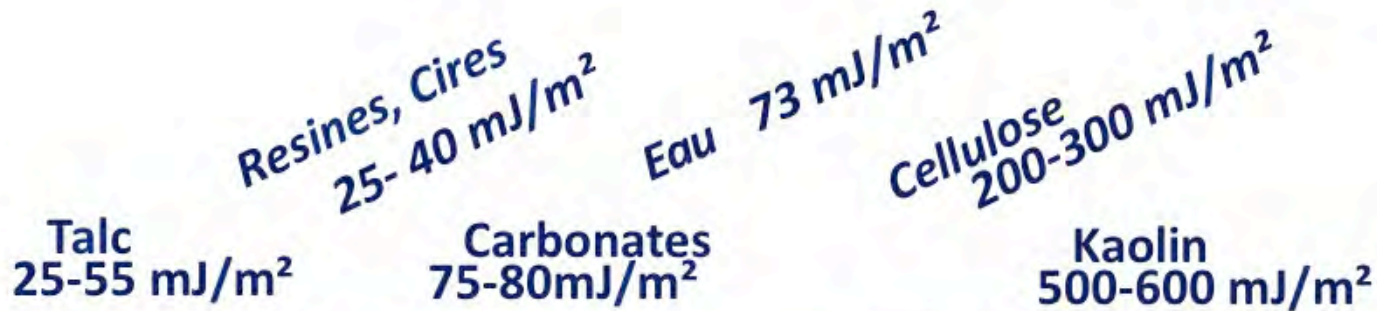


Kaolinite

(Balan et al., 2011, 2014)



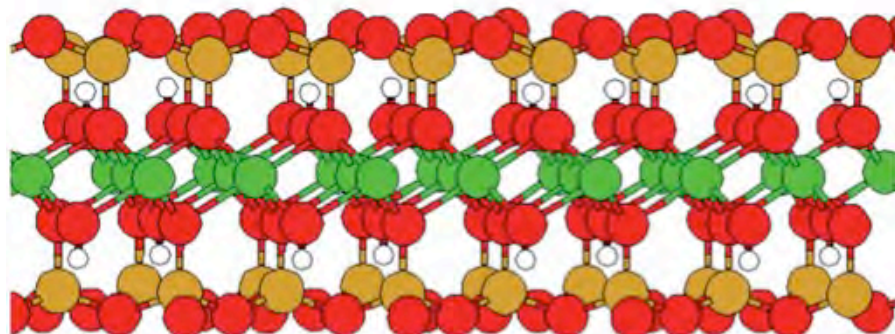
Relations structure-propriétés dans les argiles



Hydrophobe

Energie de surface

Hydrophile

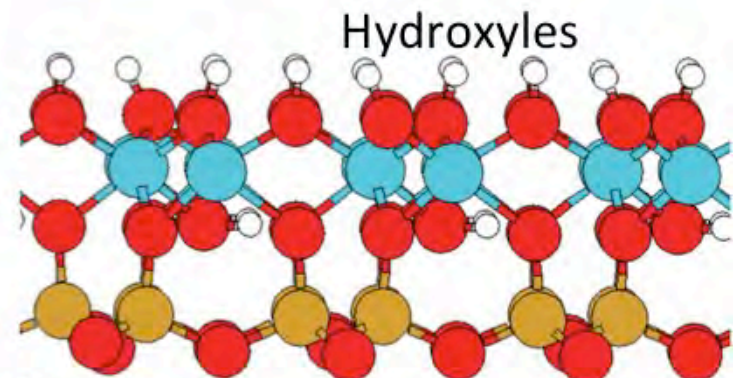
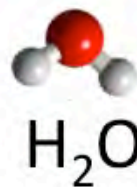


(Geysermans & Noguera, 2009)

Siloxanes

Talc

Siloxanes

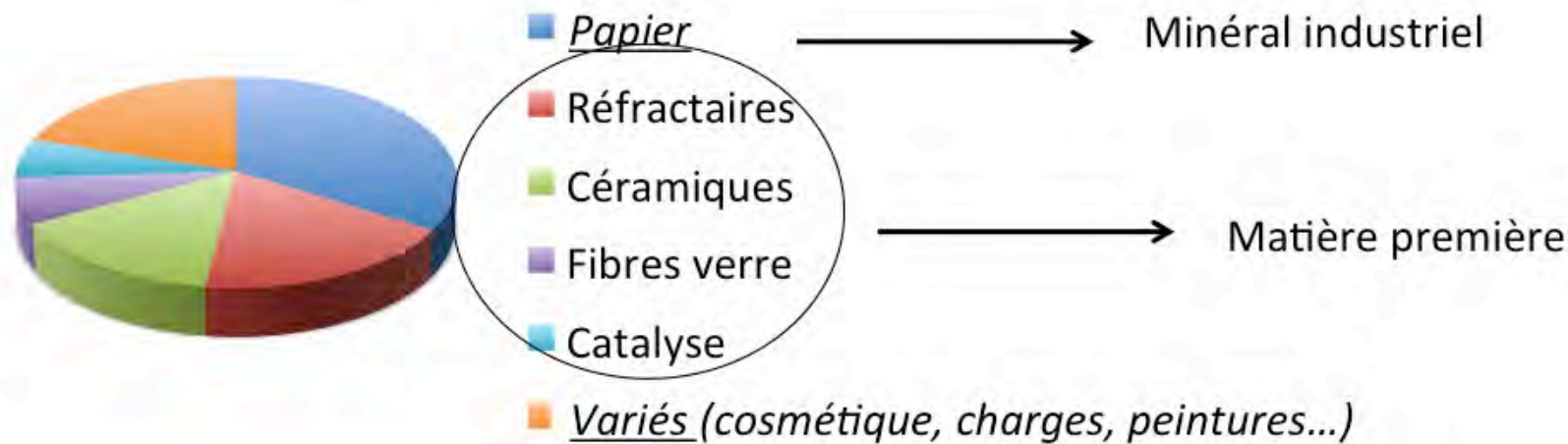


Kaolinite

Siloxanes

Usages et qualité de la ressource

Kaolin

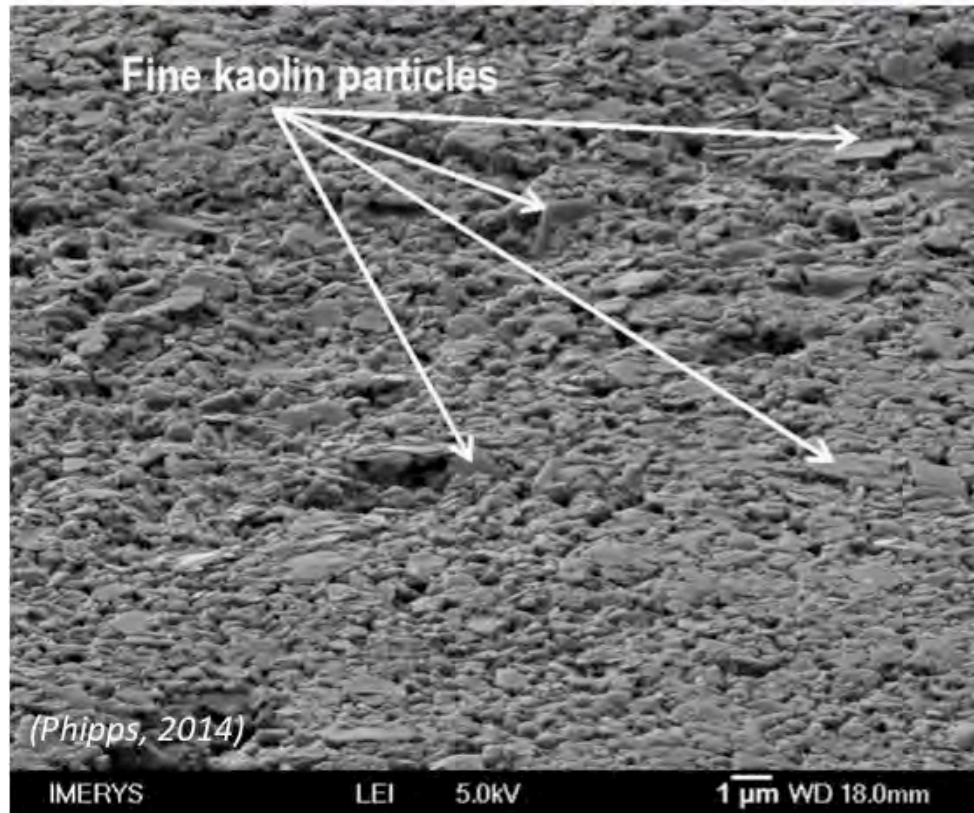


Importance des impuretés comme Fe^{3+}
(concentration, spéciation) sur les propriétés du
kaolin: morphologie des particules, couleur,
propriétés de surface...

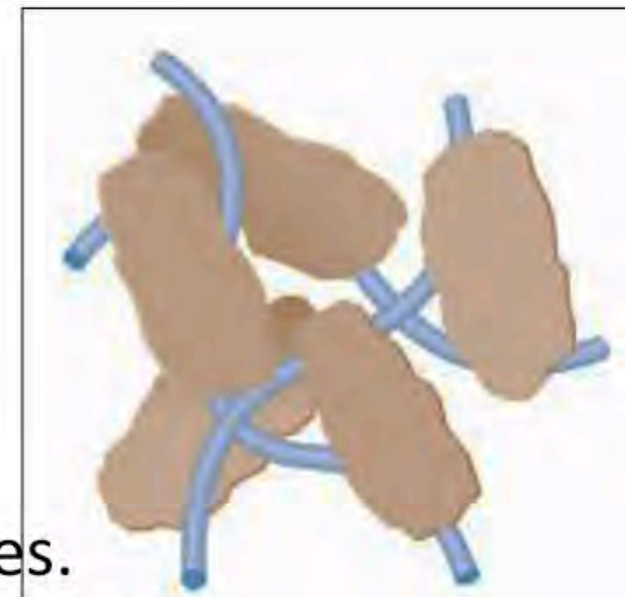
Influence différente de ces impuretés selon
l'usage: ressource brute vs matière première.



L'importance de la morphologie: le papier



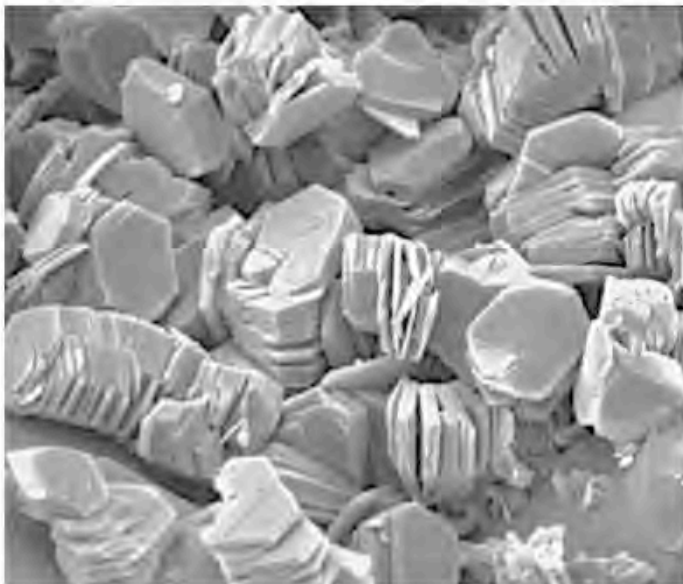
En surface de la
feuille de papier:
matériaux de
couchage (2D)



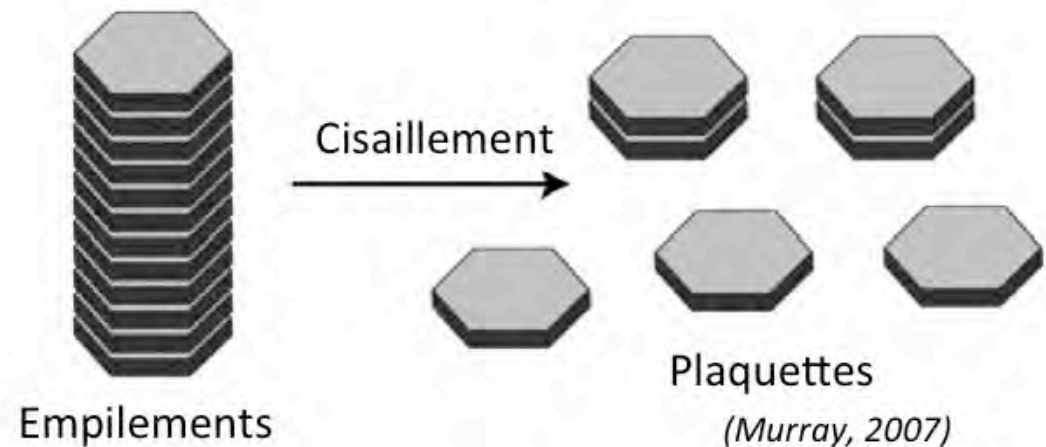
En volume: association kaolin modifié/
cellulose modifiée. Nanomatériaux hybrides.

L'importance de la morphologie: valoriser la ressource

- Valorisation des matériaux de couchage/matériaux de charge.
- Améliorer la qualité de la ressource: traitements physiques ou chimiques des kaolins si leurs propriétés (défauts) s'y prêtent.



Empilements de plaquettes de kaolinite



Transformation 3D → 2D par délamination

4. Les gisements métalliques: des témoins uniques de l'histoire de la Terre



Les gisements se forment avec des processus de concentration efficaces.

Trilogie: mobilisation-transport-dépôt

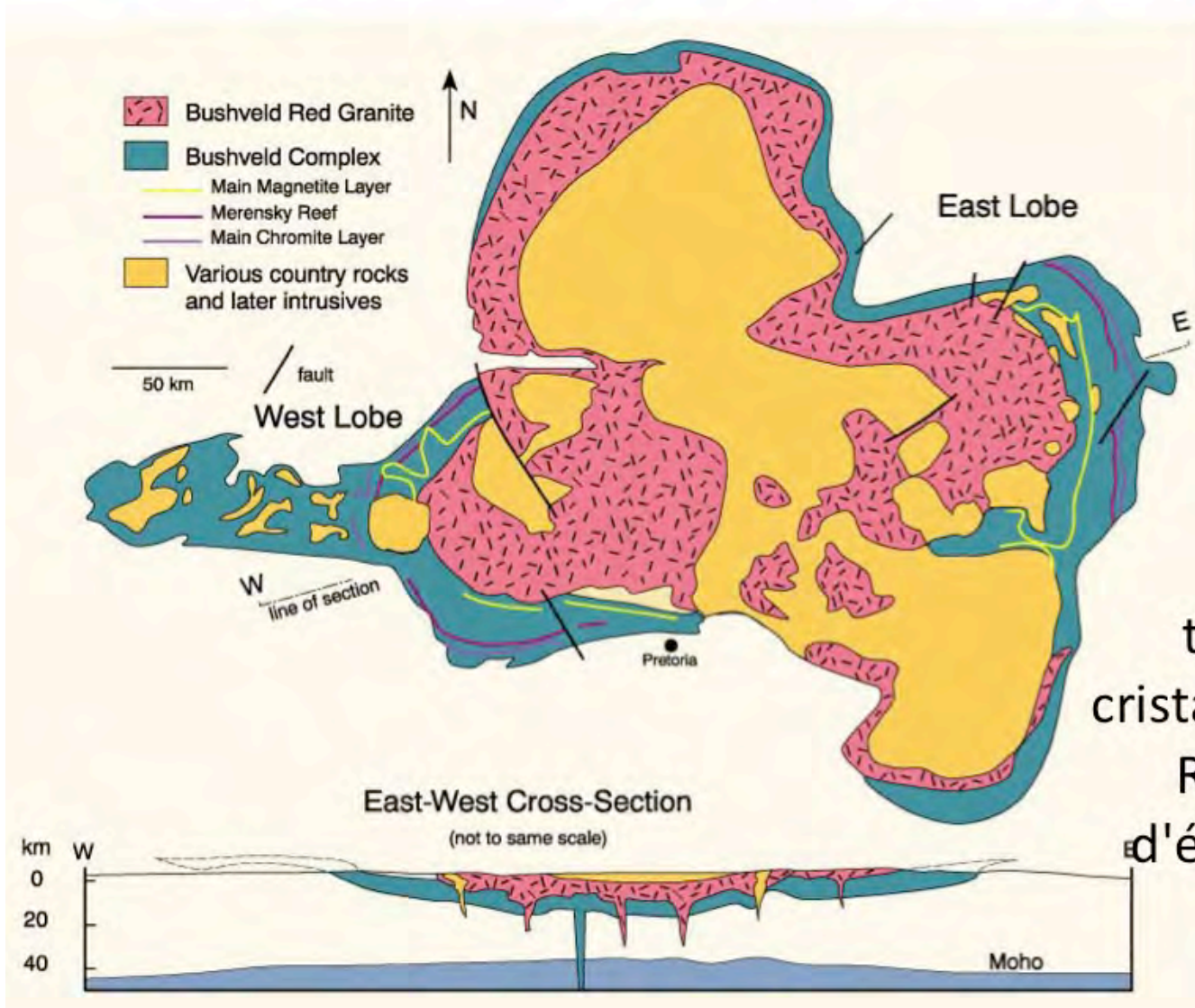
Quelques paramètres physico-chimiques:

- Solubilité/précipitation (activité des phases minérales)
- Redox: affecte directement la solubilité ($Mn^{2+/4+}$...)
- Complexation des métaux (chlorures, sulfures, matière organique...)
- Activité biologique

Des paramètres géologiques:

- Nature des terrains
- Cohérence tectonique
- Sources de chaleur
- Géochimie locale (soufre, matière organique...)

Bushveld: un des plus grands (67000 km²) et le plus riche complexe magmatique du monde (2 Ga)



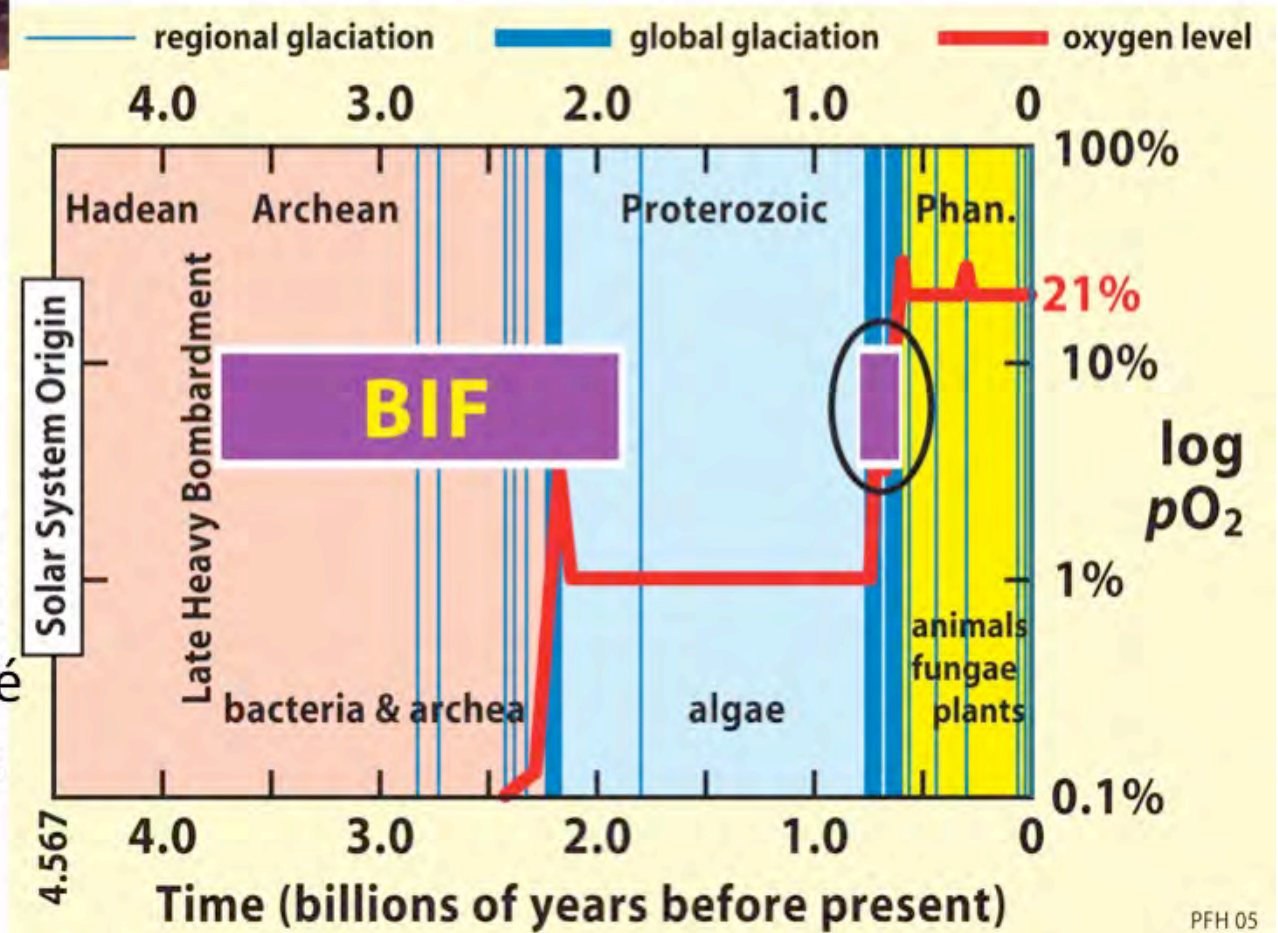
Formation à haute température, lors de la cristallisation des magmas. Réserves considérables d'éléments à forte valeur (Cr, V, Pt...).

Gisements de fer rubanés (3,5-2 Ga), témoins de l'évolution de l'atmosphère terrestre.



Mine de Carajás, Brésil: la plus importante mine de fer au monde (7 Gt Fe_2O_3 de réserves)

Fe^{2+} (soluble) oxydé en Fe^{3+} (peu soluble en pH neutre): effet de l'activité photosynthétique dans les océans.



Les minerais de Nouvelle-Calédonie



Phyllosilicate nickelifère
(minerai: vert).

Les minerais silicatés sont traités par pyroméallurgie. Nouvelles technologies nécessaires pour traiter la "nouvelle" ressource dans les latérites: Ni+ Co +...

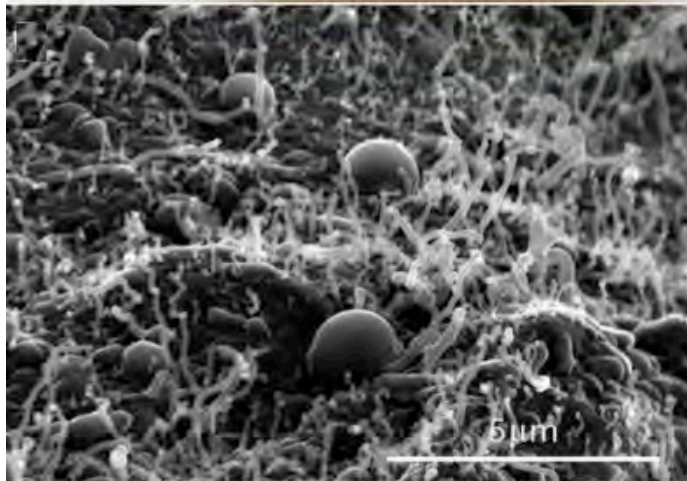


"Cobaleur" au 19^{ème} siècle

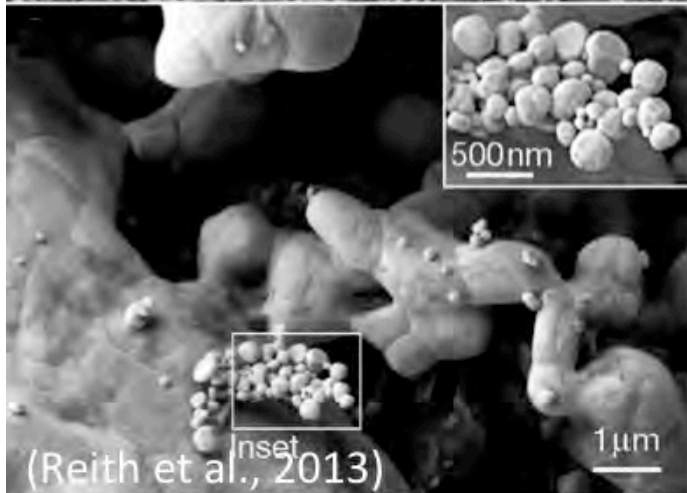


L'or natif n'est pas immobile: le rôle de l'activité bactérienne.

"Le Chameau", pépite de 9,3 kg
Russian Diamond Fund;

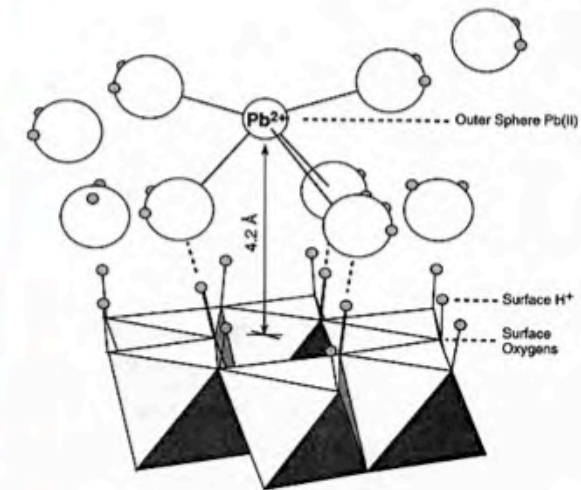


Présence de biofilms à la surface
des particules d'or natif.



Formation de nanoparticules d'or
à l'intérieur des biofilms.

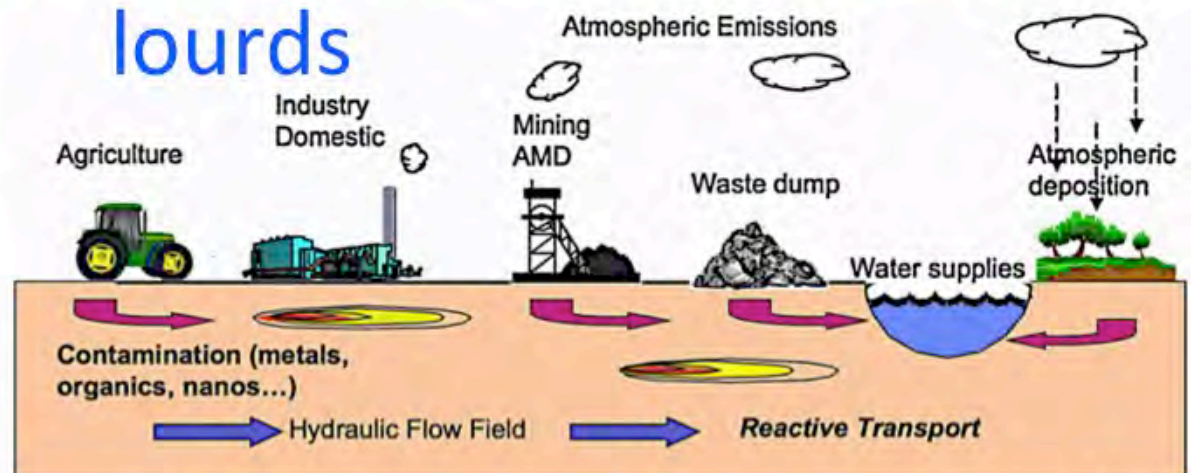
5. Développement durable: les impacts environnementaux



Pb^{2+} piégé à la surface
(0001) de $\alpha-Al_2O_3$

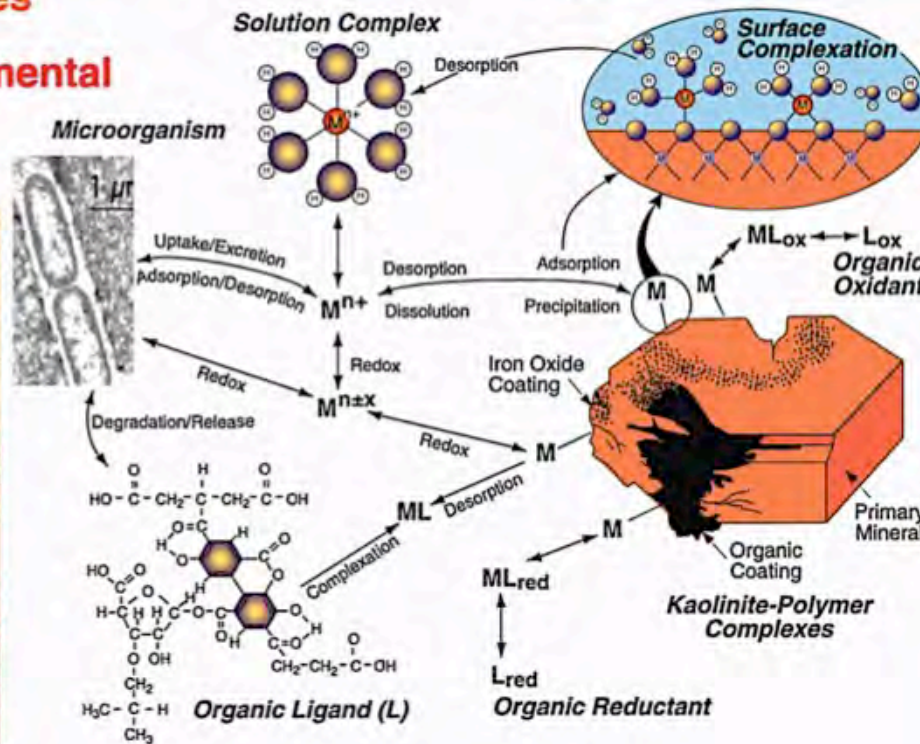
(Brown and Calas, 2012; Bargar et al., 1997)

La contamination des sols par les métaux lourds



(Brown and Calas, 2011)

Molecular-Scale Processes in Environmental Science



Evolution des milieux physiques sous forçage contaminant:

- des processus multi-échelles
- le facteur temps
- des acteurs variés
- des nouveaux métiers.

L'impact des éléments traces métalliques

hydrogène 1 H 1,0079																	hélium 2 He 4,0026																
lithium 3 Li 6,941	beryllium 4 Be 9,0122																	boron 5 B 10,811	carbone 6 C 12,011	azote 7 N 14,007	oxygène 8 O 15,999	fluorine 9 F 18,998	neon 10 Ne 20,180										
sodium 11 Na 22,989	magésium 12 Mg 24,305																	aluminium 13 Al 26,982	silicium 14 Si 28,086	phosphore 15 P 30,974	soufre 16 S 32,065	chlore 17 Cl 35,453	argon 18 Ar 39,948										
potassium 19 K 39,098	calcium 20 Ca 40,078	scandium 21 Sc 44,956	titane 22 Ti 47,867	vanadium 23 V 50,942	chrome 24 Cr 51,996	manganèse 25 Mn 54,938	fer 26 Fe 55,845	cobalt 27 Co 58,933	nickel 28 Ni 58,693	cuivre 29 Cu 63,546	zinc 30 Zn 65,38	gallium 31 Ga 69,723	germanium 32 Ge 72,61	arsenic 33 As 74,922	sélénium 34 Se 78,96	bromure 35 Br 79,904	krypton 36 Kr 83,80																
rubidium 37 Rb 85,468	strontium 38 Sr 87,62	yttrium 39 Y 88,906	zirconium 40 Zr 91,224	niobium 41 Nb 92,906	molybdène 42 Mo 95,94	technétium 43 Tc 98	ruthénium 44 Ru 101,07	rhodium 45 Rh 102,91	palladium 46 Pd 106,42	argent 47 Ag 107,87	cadmium 48 Cd 112,41	indium 49 In 114,82	étain 50 Sn 118,71	antimoine 51 Sb 121,76	tellure 52 Te 127,60	iode 53 I 126,90	xénon 54 Xe 131,29																
caesium 55 Cs 132,91	barium 56 Ba 137,33	* 57-70																lanthane 57 La 138,91	hafnium 72 Hf 178,49	tantalum 73 Ta 180,95	tungstène 74 W 183,84	rénium 75 Re 186,21	osmium 76 Os 190,23	iridium 77 Ir 192,22	platine 78 Pt 195,08	or 79 Au 196,97	mercure 80 Hg 200,59	thallium 81 Tl 204,38	plomb 82 Pb 207,2	bismuth 83 Bi 208,98	polonium 84 Po 209	astate 85 At 210	radon 86 Rn 222
francium 87 Fr [223]	radium 88 Ra [226]																	actinium 89 Ac [227]															



Dangereux/Toxique



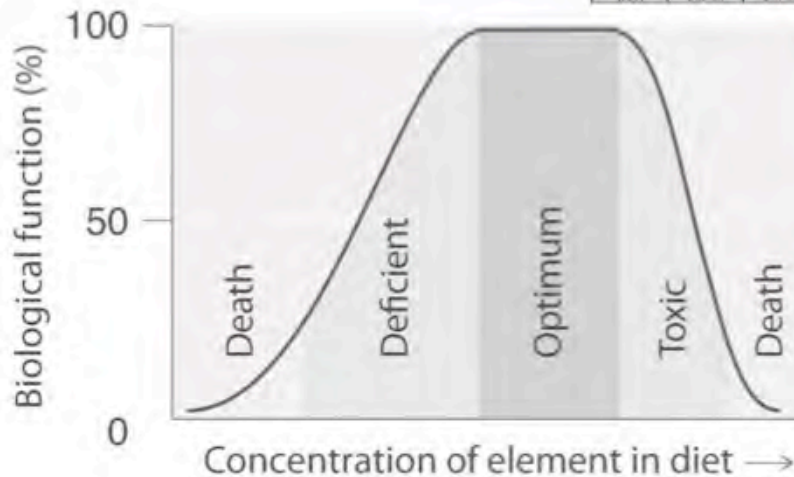
Essentiel

* Lanthanide series

lanthane 57 La 138,91	cerium 58 Ce 140,12	praseodyme 59 Pr 140,91	neodyme 60 Nd 144,24	prométhée 61 Pm [147]	samarium 62 Sm 150,36	europium 63 Eu 151,96	gadolinium 64 Gd 157,25	terbium 65 Tb 158,93	dysprosium 66 Dy 162,50	holmium 67 Ho 164,93	erbium 68 Er 167,26	thulium 69 Tm 168,93	ytterbium 70 Yb 173,04
--------------------------------	------------------------------	----------------------------------	-------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	--------------------------------	----------------------------------	-------------------------------	----------------------------------	-------------------------------	------------------------------	-------------------------------	---------------------------------

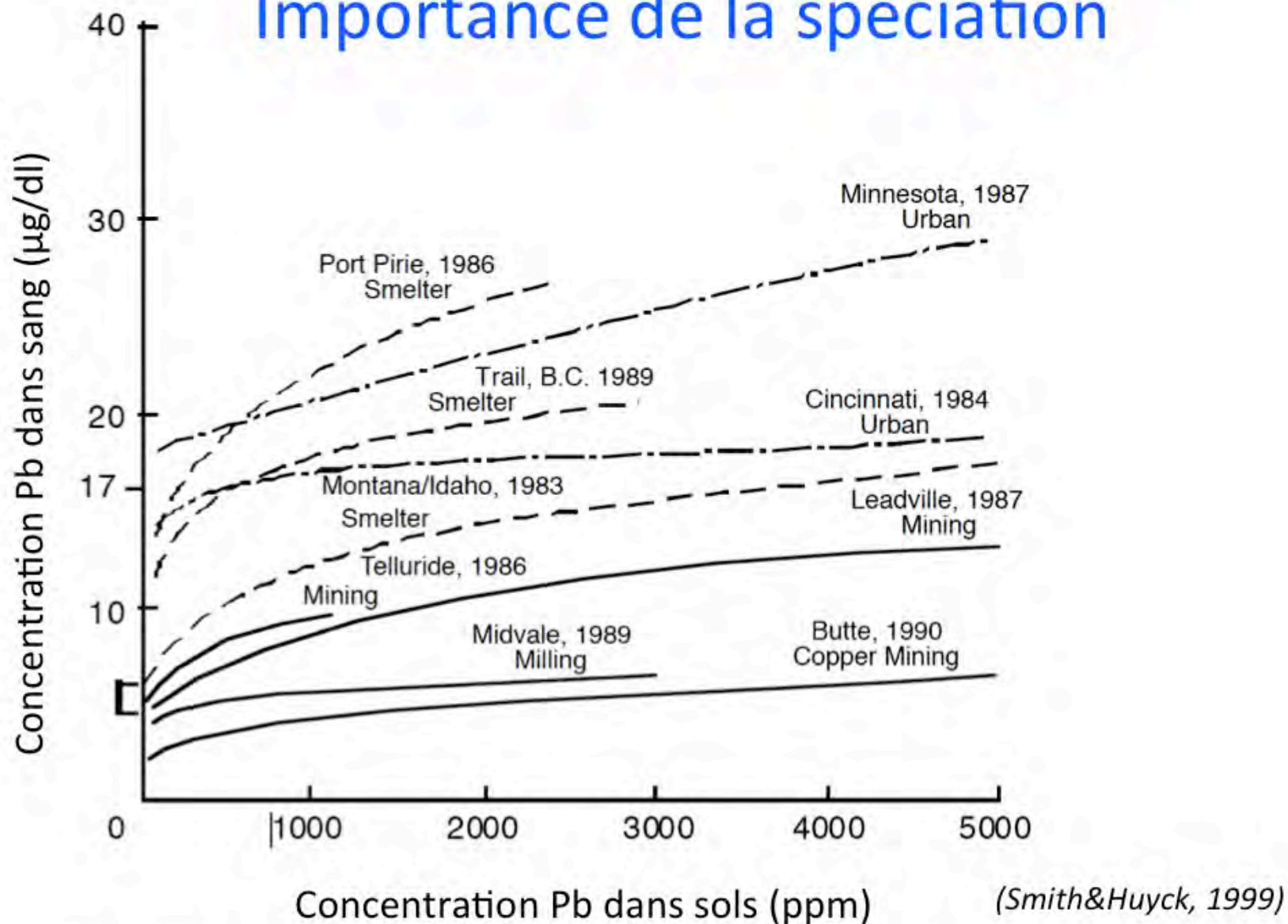
** Actinide series

actinium 89 Ac [227]	thorium 90 Th 232,04	protactinium 91 Pa 231,04	uranium 92 U 238,03
-------------------------------	-------------------------------	------------------------------------	------------------------------



"Rien n'est poison, tout est poison : seule la dose fait le poison" (Paracelse)

Importance de la spéciation



L'impact sanitaire de la contamination dépend de la spéciation (environnement cristallochimique).

Eléments traces métalliques et activité minière

Action "instantanée"

Catastrophes environnementales
(par ex. Aznalcollar, 1998).

Impacts à court et long terme.

Aspect régional.

Temps géologiques

Concentrations naturellement
élevées: **anomalies géochimiques.**

Minéraux stables, peu solubles.

As, Cd, Pb, Hg, Sb, Cr...

Transferts dans les fleuves (Garonne...),
à partir d'anciens sites miniers.

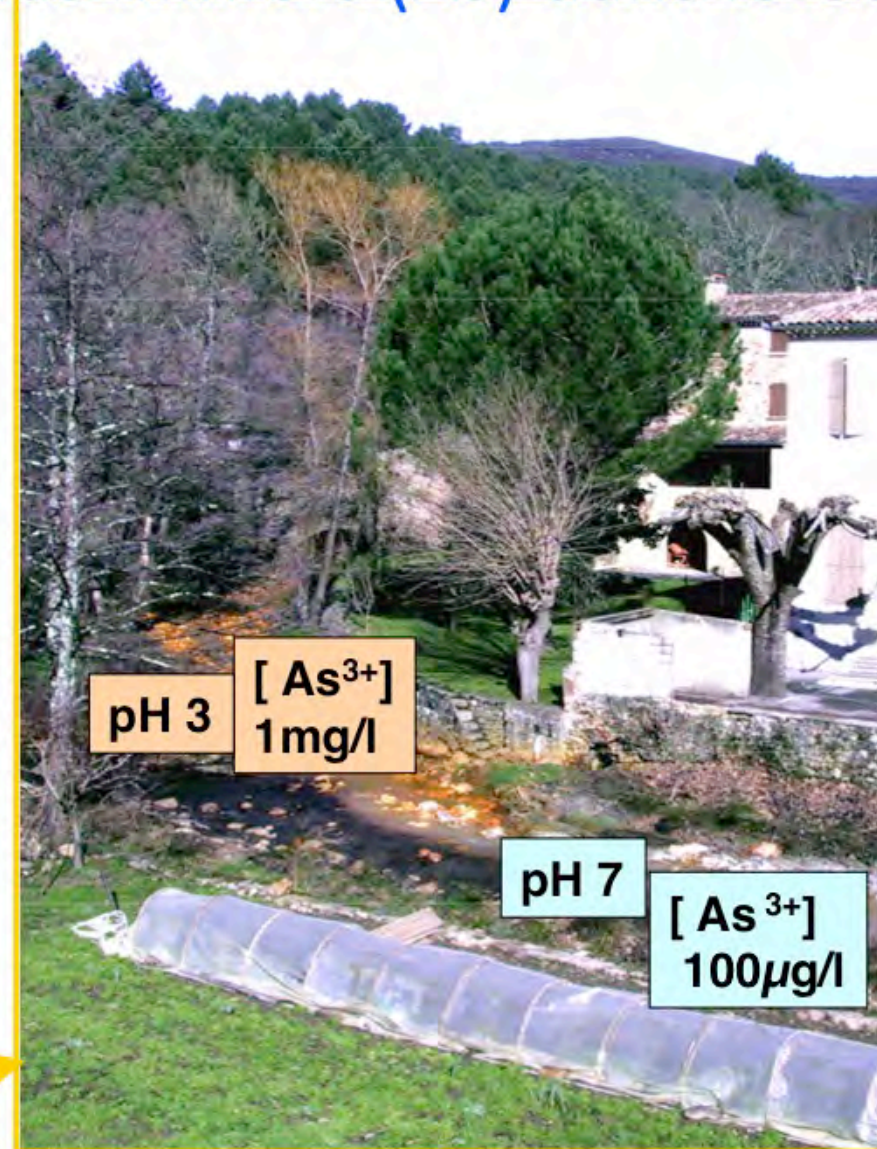
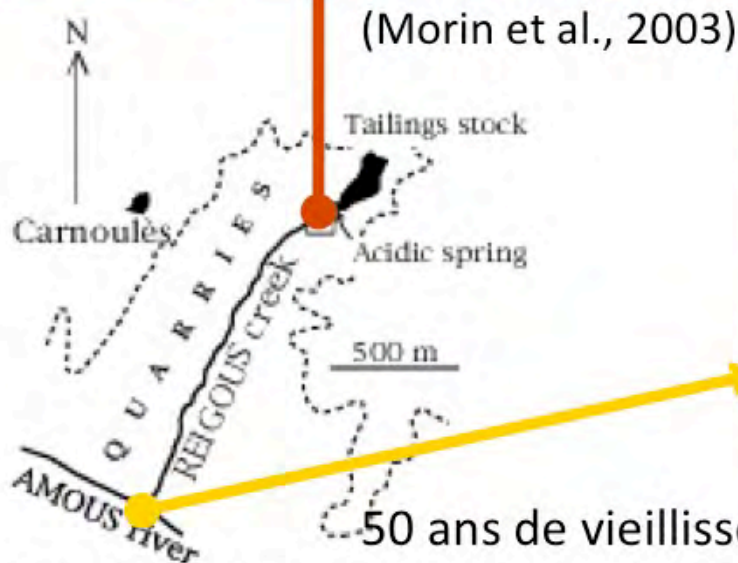
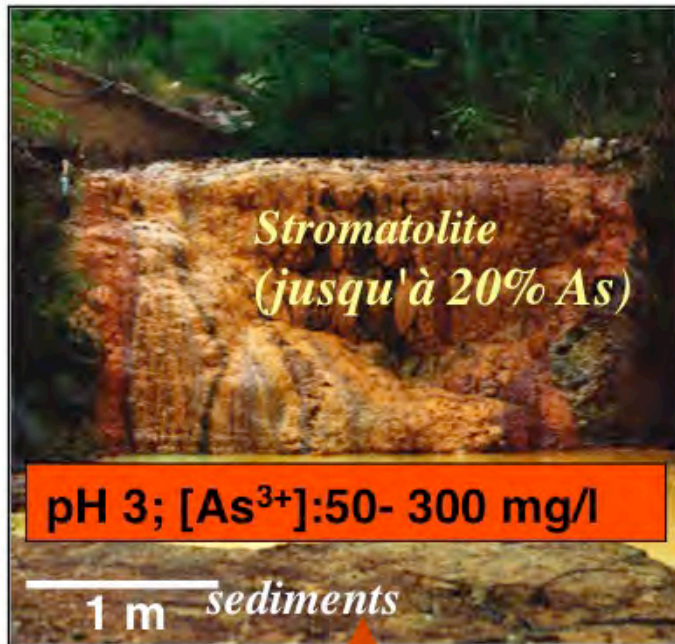
Impacts retardés, aspect régional.

Evolution d'anciens résidus miniers.

Impacts retardés, aspect local.

"Bombes à retardement"

Evolution d'anciens résidus miniers (As) dans le Gard



50 ans de vieillissement des résidus: oxydation de sulfures (+As)
Les concentration en As baissent vers l'aval, restant au-dessus des normes (10 µg/l)

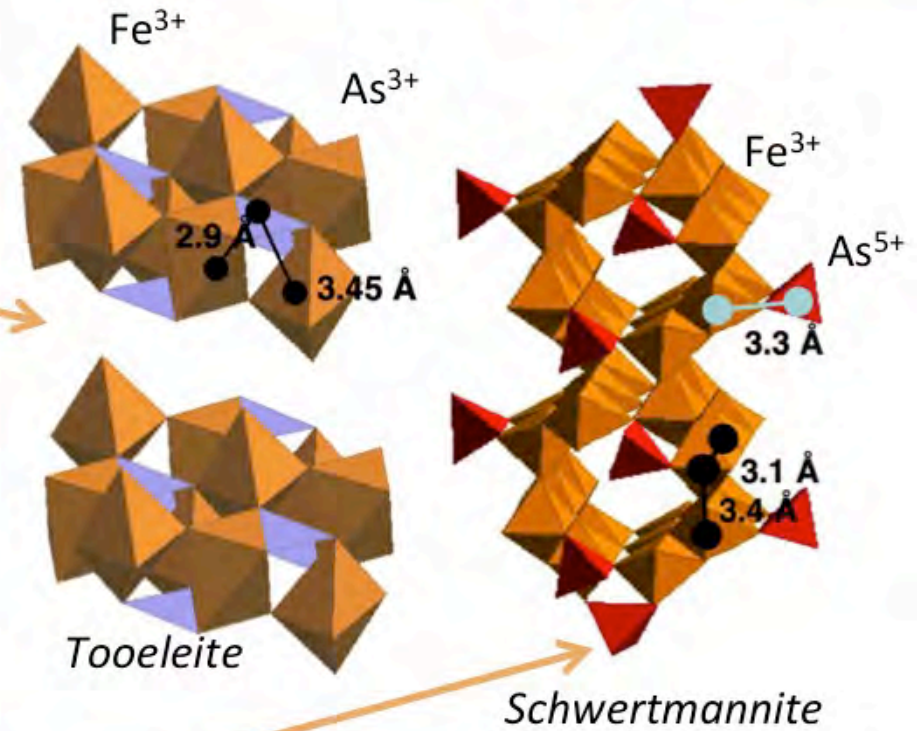
Printemps

Bactéries:
Acidithiobacillus ferroxydans

Tooeleite:
Fe³⁺ & As³⁺

SCOWAJ Photo No.=54 200nm

Des structures pouvant piéger As^{3+/5+}



Eté

Bactéries:
Thiomonas

As-schwertmannite:
Fe³⁺ & As⁵⁺

(Morin et al., 2003, 2007)
SCOWCM Photo No.=47 200nm

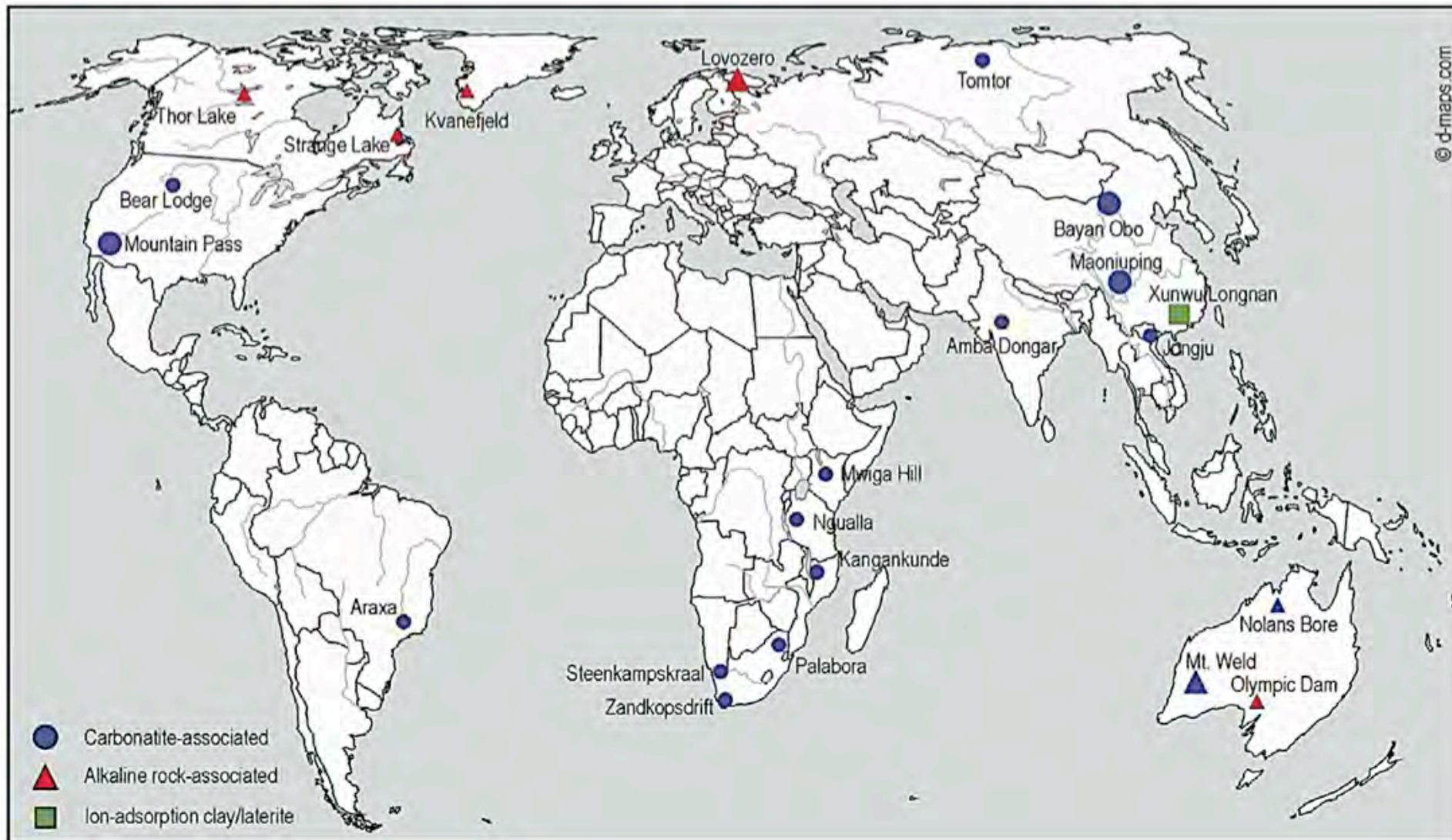
Printemps: As³⁺ co-précipite avec Fe³⁺
(Thiobacillus Ferrooxydans n'oxyde que Fe²⁺: minéraux As³⁺-Fe³⁺)

Eté: Thiobacillus (Fe²⁺) +Thiomonas (As³⁺)=
minéraux As⁵⁺-Fe³⁺+ As-adsorption

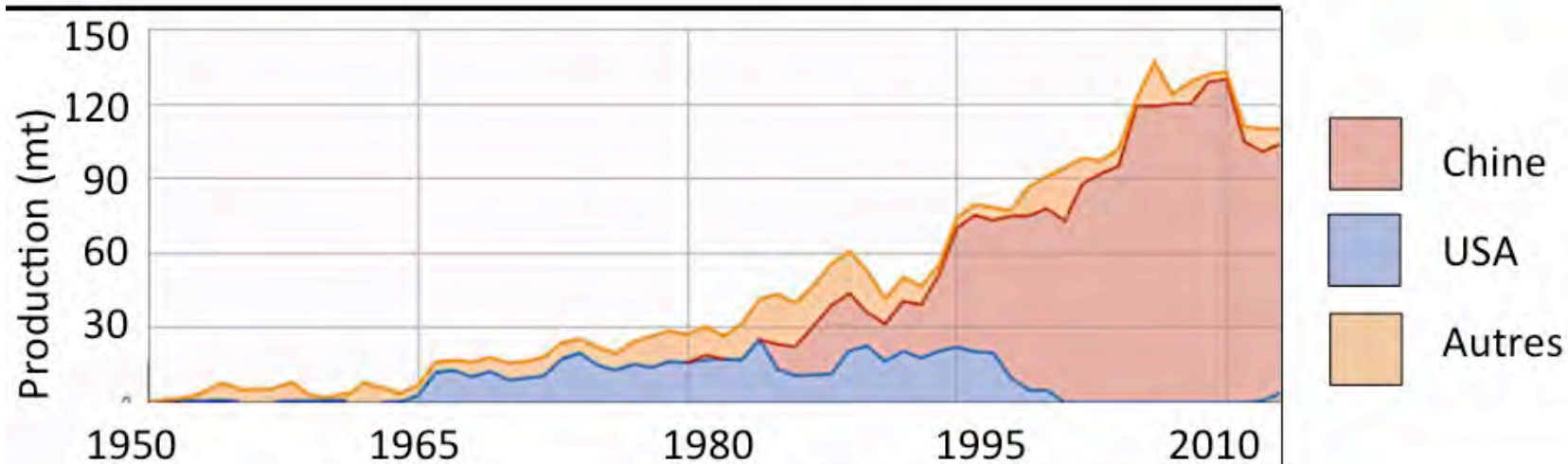
6. Développement durable, métaux critiques: court vs. long terme



Des ressources mal partagées: les gisements de terres rares



Les terres rares: criticité de la ressource?

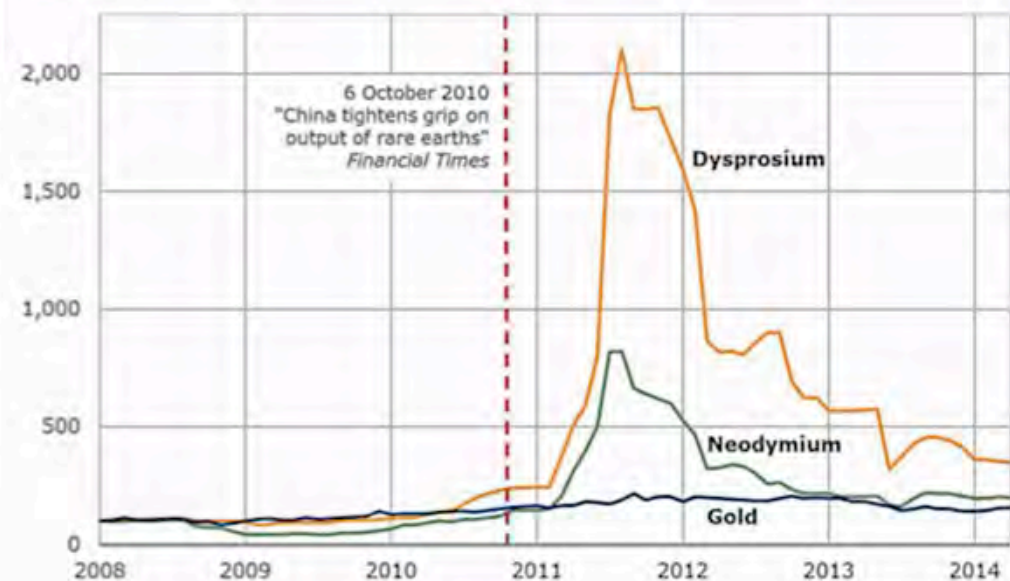


Une crise médiatisée:
les incidents de 2010 et leurs
conséquences sur le domaine
des terres rares.

Cours des terres rares:
le court terme.

Rare earth metal prices compared with gold

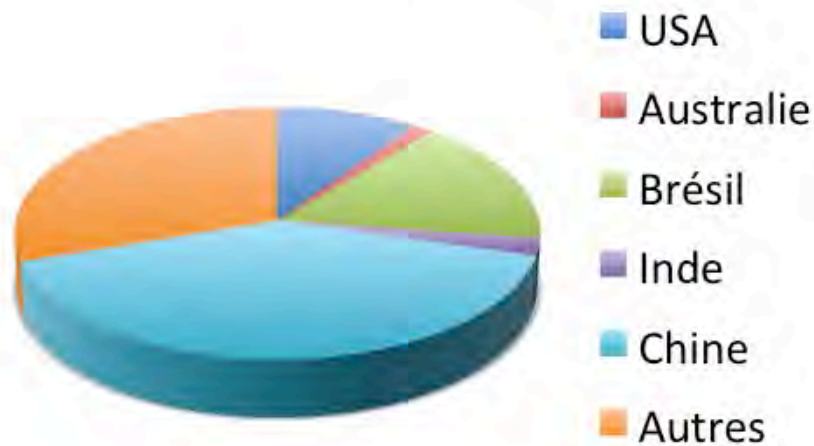
% of January 2008 price



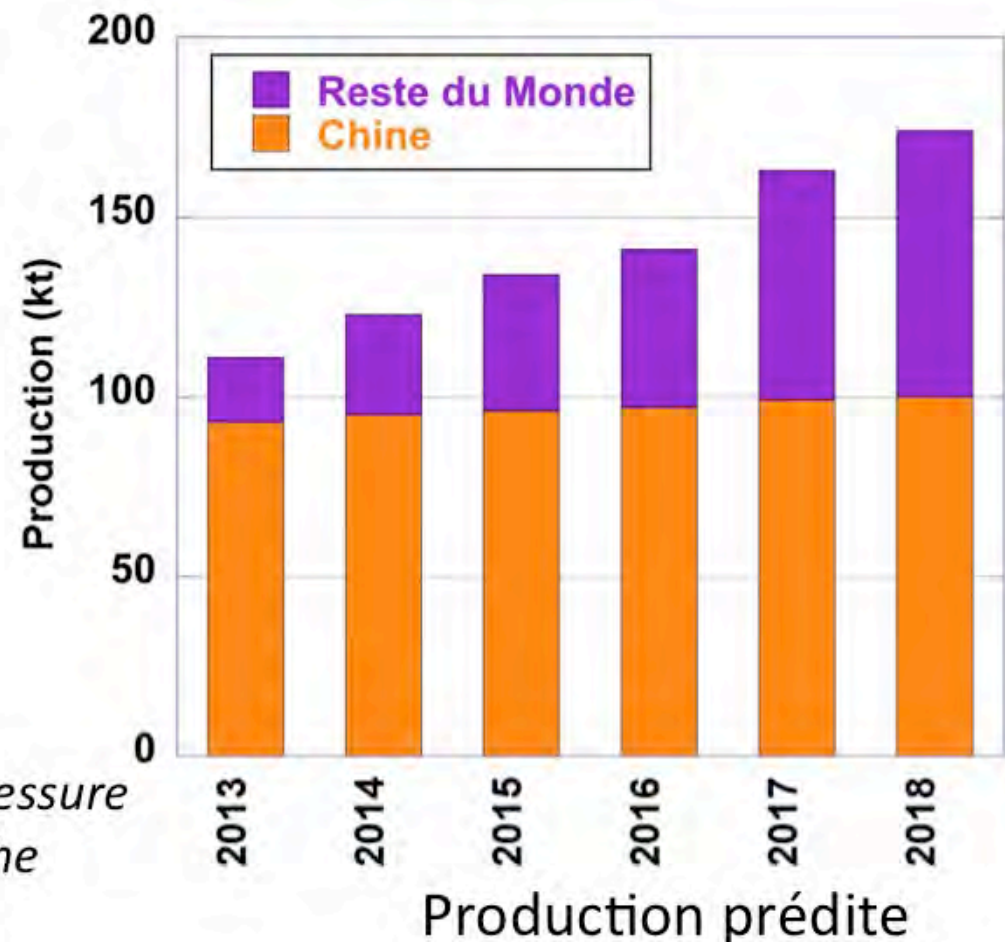
Source: Bloomberg

Les terres rares: après la crise

Réserves mondiales (140 Mt)

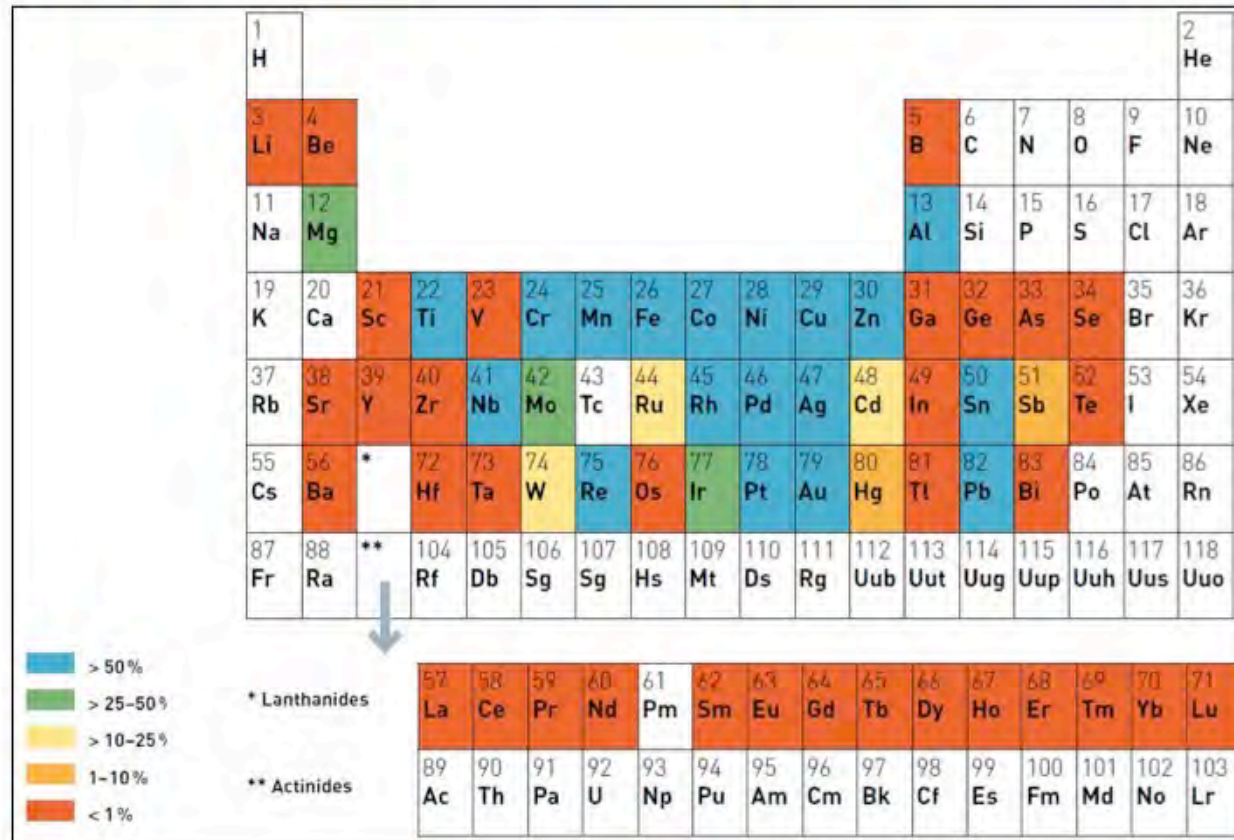


Réponse à moyen/long terme au forçage économique.



"Policymakers should not succumb to pressure to act too quickly or too expansively in the face of raw materials threat" (E. Gholz)

Recyclage, re-usage: les nouveaux horizons



Taux de recyclage des éléments (surtout des métaux).

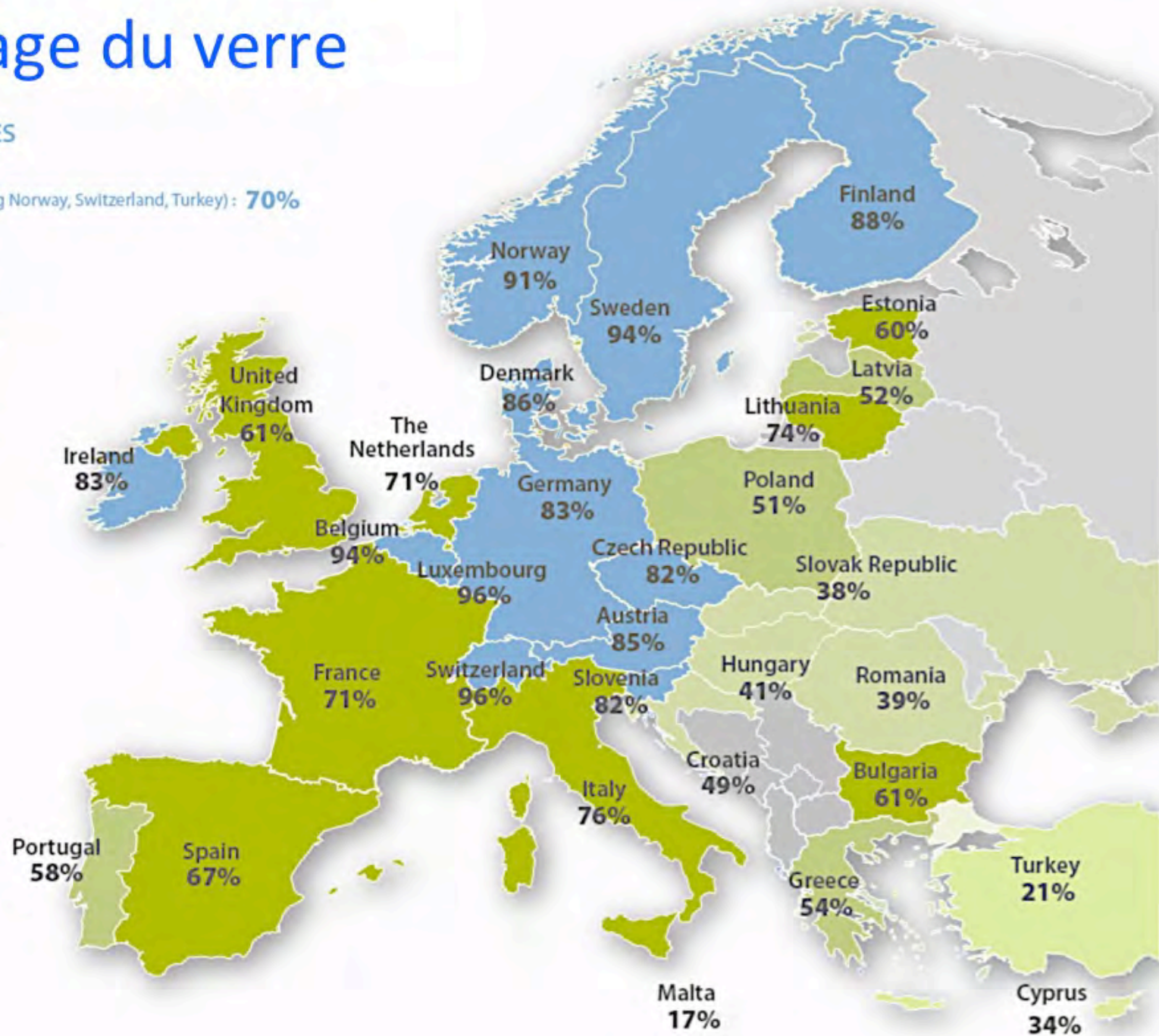
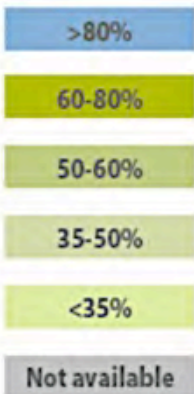
- De forts contrastes, des possibilités techniques très variées.
- Limitations à aborder dès le stade de l'élaboration du produit.
- Diversification des métiers pour utiliser les gisements de "matières premières secondaires" (BTP...).

Recyclage du verre

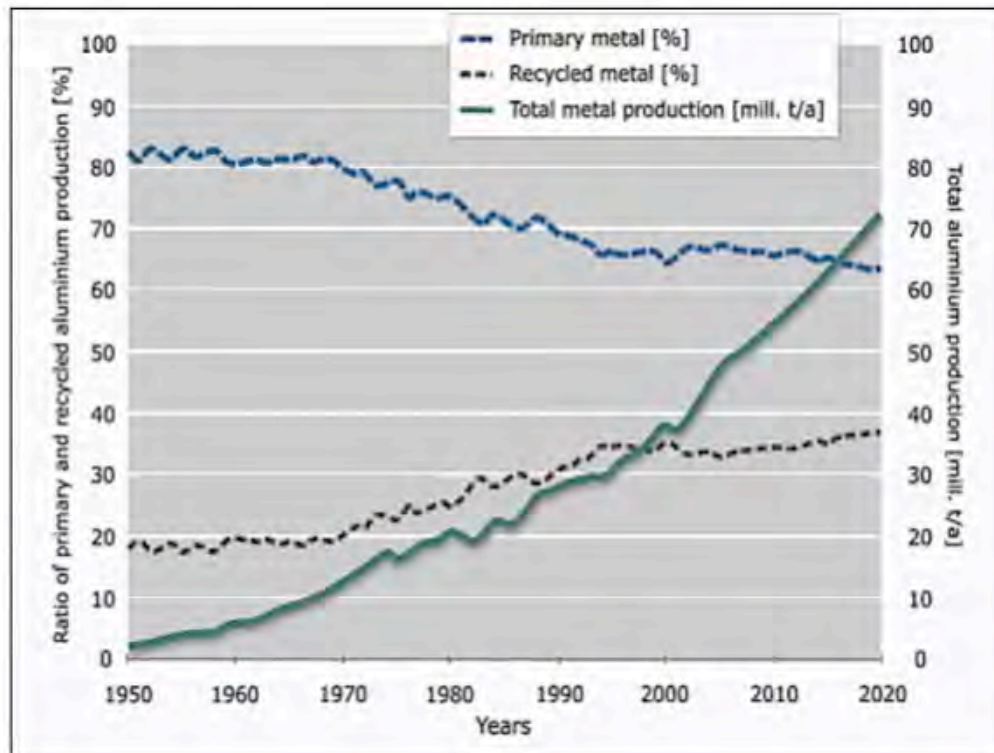
AVERAGE RATES

EU28: **70%**

EUROPE (including Norway, Switzerland, Turkey): **70%**



Une évolution minière non tenable sans recyclage?



Aluminium

Diminution progressive de l'activité minière directe.

“Primary metal production fills the gap between the availability of secondary material and total demand.” (ICM, 2006)

Un exemple de réflexion sur l'activité minière : le CNRT "Nickel et son environnement", Nouméa

*Secrétariat d'État à l'Enseignement
supérieur et à la Recherche
Ministère des Outre-Mer*

Collectivités territoriales

Secteur industriel

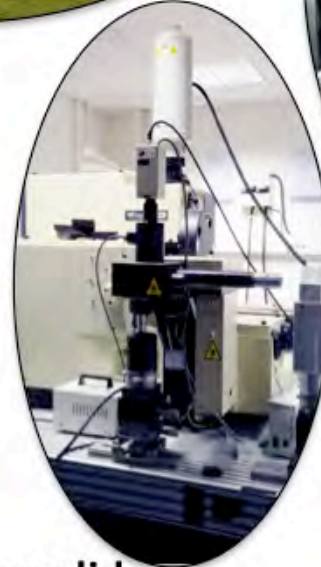
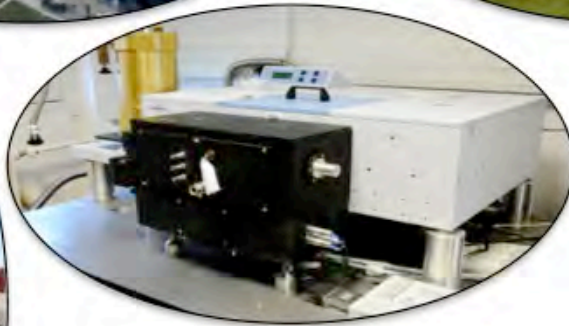


Nickel et technologie

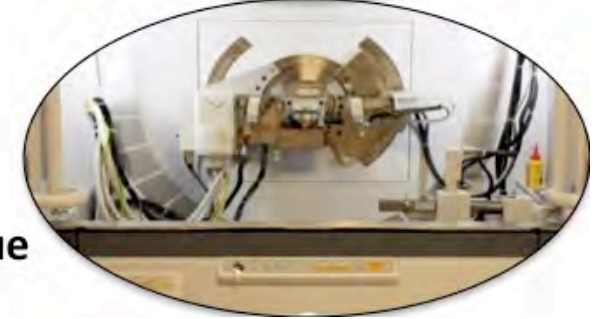
Nickel et société

Nickel et environnement naturel

7. Des outils adaptés pour suivre "à la trace" les éléments chimiques



Grands instruments
Spectromètres du solide
Microscopes électroniques
Diffractomètres
Méthodes de simulation numérique



En guise de conclusion

- Gisements: conjonction unique d'évènements géologiques dans des gammes P/T/bio très variés;
- Le futur: gisements en réévaluation positive, souvent en contexte difficile; nouveaux traitements de la ressource; recyclage...
- Nécessité de recherche/R&D à long terme;
- Garder une formation de qualité et un potentiel de matière grise dans ce domaine discret mais vital.



INSTITUTO NACIONAL
DE ENERGIA NUCLEAR



Merci...

... aux personnalités qui ont participé
aux Séminaires et au Colloque

... aux organismes et établissements à
qui j'ai appartenu pendant ma carrière;

... ma famille et mes proches.