



Où sont les métaux pour les technologies du futur ?

Prof. Eric PIRARD



La découverte des métaux

*De l'Age de la Pierre
à l'Age du Wallium*

Les Sept métaux de l'Antiquité

7 jours - 7 planètes

... mais aussi Sb, As, Bi, S et C...

Au



Sol



Mercurius



Venus



Luna

Ag

Pb



Mars



Iupiter



Saturnus

Fe

Sn

Hg

- ▶ Un huitième sera découvert en 1735 en Equateur ...



La découverte du Gallium

Liège - Capitale du Zinc

▶ 1809

▶ Première production industrielle de Zn

- Dony & Cie (St Léonard)



▶ 1875

▶ Paul-Emile Lecoq de Boisbaudran

- Reçoit 4t de minerai fourni par la Vieille-Montagne

▶ Il isole 75 g d'un nouvel élément qu'il nomme Gallium (Ga)

- Référence à la Gaule



▶ 1970

▶ Premières applications commerciales du Ga

- Diodes photométriques (GaAsP)



Wikimedia





Métaux et Evolution Technologique

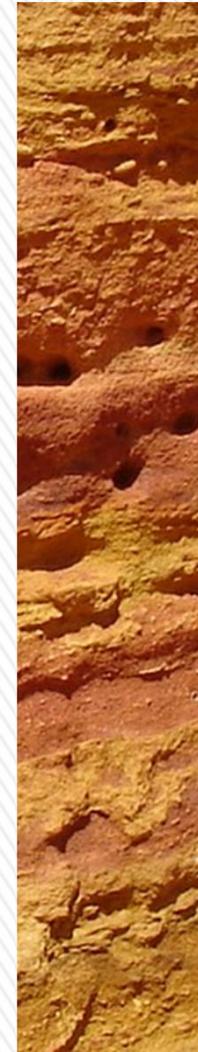
*De Lascaux
à Barco*

Une histoire de rouge

De Lascaux à Barco



- Rouge: Fe_2O_3 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$
 - Oxydes de fer naturels (ocres)
- Noir : MnO
 - Oxydes de manganèse naturels

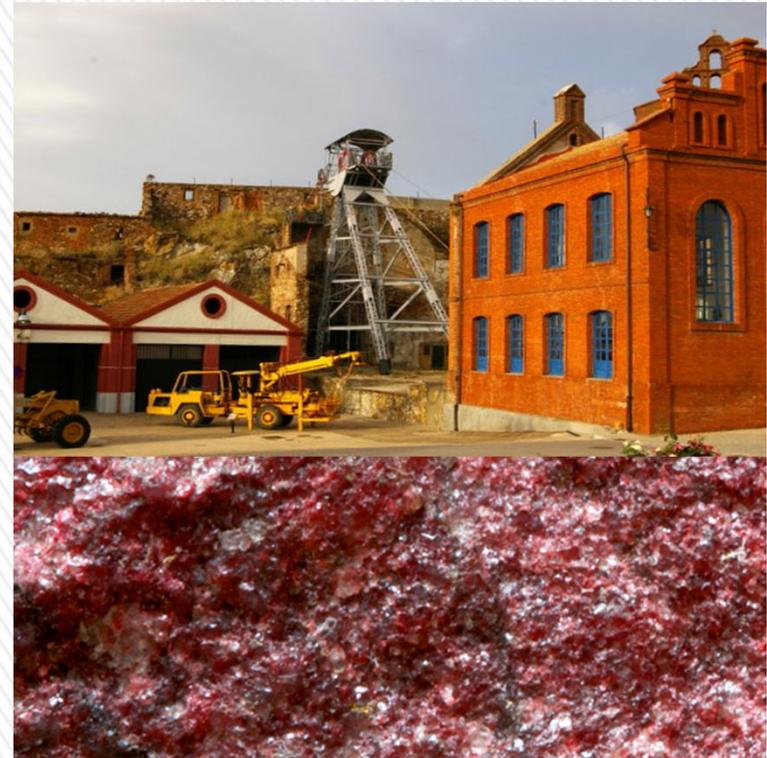
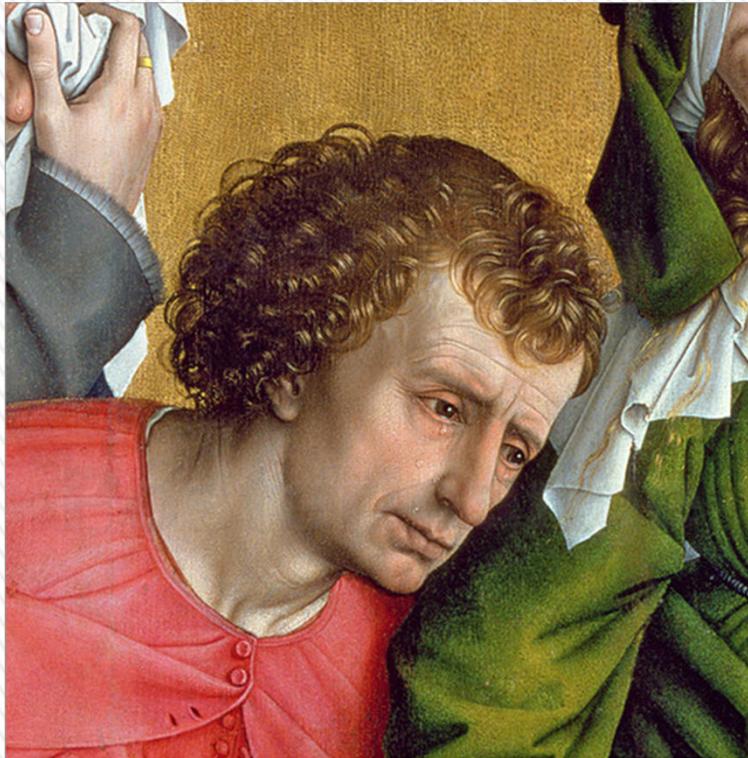


Rustrel - Colorado Provençal



Une histoire de rouge

De Lascaux à Barco



- Rouge Vermillon: HgS
 - Sulfure de mercure naturel (cinabre)

Almadén (ES)
2000 ans d'exploitation



» *Convention internationale pour le bannissement du mercure (Genève - Jan 2013)*



Une histoire de rouge

De Lascaux à Barco



Bayan Obo (CN)
> 90% production mondiale



© smart-elements.com

- Luminophore rouge : $\text{Eu:Y}_2\text{O}_3$
 - Oxyde Yttrium-Europium synthétique

» *Pas de substitution possible à ce jour*



Une histoire de rouge

Leçons d'une évolution

- ▶ Exigences **croissantes** sur les matières premières
 - ▶ Qualité
 - ▶ Quantité

- ▶ Prise en compte de l'impact **environnemental**
 - ▶ Toxicité de certains composés
 - ▶ Bilan sur l'ensemble du « cycle de vie »
 - *du minerai au produit en fin de vie*

- ▶ La **substitution** a ses limites
 - ▶ Éléments irremplaçables
 - ▶ Evolution du cours des matières premières

- ▶ Les matières premières **ne sont pas chères**
 - ▶ < 10 % du coût d'un PC
 - Dont 8% (Me précieux), 1,3% (Me base) et 0,07% (Me rares))
 - ▶ Coût vérité





Métaux et Evolution Technologique

*De Edison
à Nakamura*

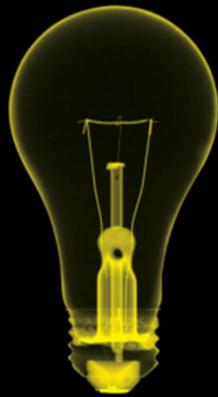
Une histoire de lumens

De Edison à Nakamura

► 2013

► Bannissement des lampes à incandescence

Incandescence

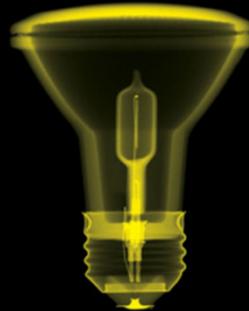


12-20 lm/W

Tungstène

Verre,...

Halogène

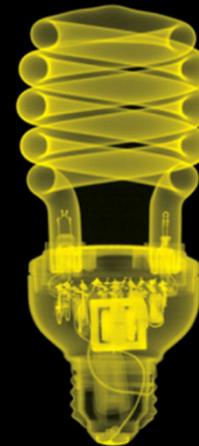


18-25 lm/W

Tungstène

Iode, Brome, ...
Verre,...

Fluo-compacte

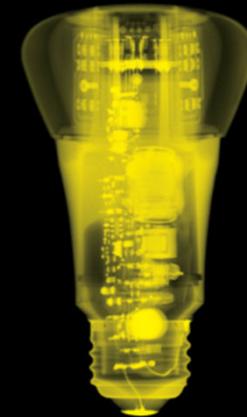


60-80 lm/W

Tungstène

Mercure, Terres Rares, ...
Verre, Plastique,...

LED



25-140 lm/W

Gallium

Indium, Cerium, Yttrium,
Cuivre, Argent, Silicium, ...
Plastique, ...



Une histoire de lumens

Leçons d'une évolution

- ▶ Complexité croissante des technologies et des matériaux
 - ▶ Electricité => Microélectronique
 - ▶ Matériaux de base => Nanotechnologies
 - DESIGN FOR **DISASSEMBLING**

- ▶ Recyclabilité de plus en plus difficile
 - ▶ Mélanges complexes
 - ▶ Nécessité d'une séparation à l'échelle atomique
 - DESIGN FOR **RECYCLING**

- ▶ Besoin d'organiser la collecte des objets en fin de vie
 - ▶ Législation, Logistique, Education,...
 - ▶ Mobilité et variabilité du gisement
 - *Les ampoules d'aujourd'hui ne sont plus celles d'hier*





Pourquoi les métaux seraient-ils critiques ?

Le syndrome des terres rares

L'assurance d'un accès fiable et sans distorsion aux matières premières constitue un facteur de plus en plus important pour la compétitivité de l'UE.

Communication de la Commission au Parlement et au Conseil, 6 mai 2010

Métaux Critiques

Le syndrome des "Terres Rares"

*L'Europe consomme 20% des métaux mais n'en extrait que 3%
La Chine a produit plus de 90 % des concentrés de terres rares*

► Pourquoi une matière première serait-elle critique?

► Dimension géologique

- Abondance moyenne dans la croûte terrestre
- Existence de concentrations
- Accompagnement de la mine d'autres métaux (co-produit)

► Dimension géopolitique

- Risque d'approvisionnement élevé, forte dépendance vis-à-vis des importations et niveau élevé de concentration dans certains pays.

► Dimension économique

- Les produits de substitution font défaut
- Importance stratégique dans certains secteurs clés de la technologie

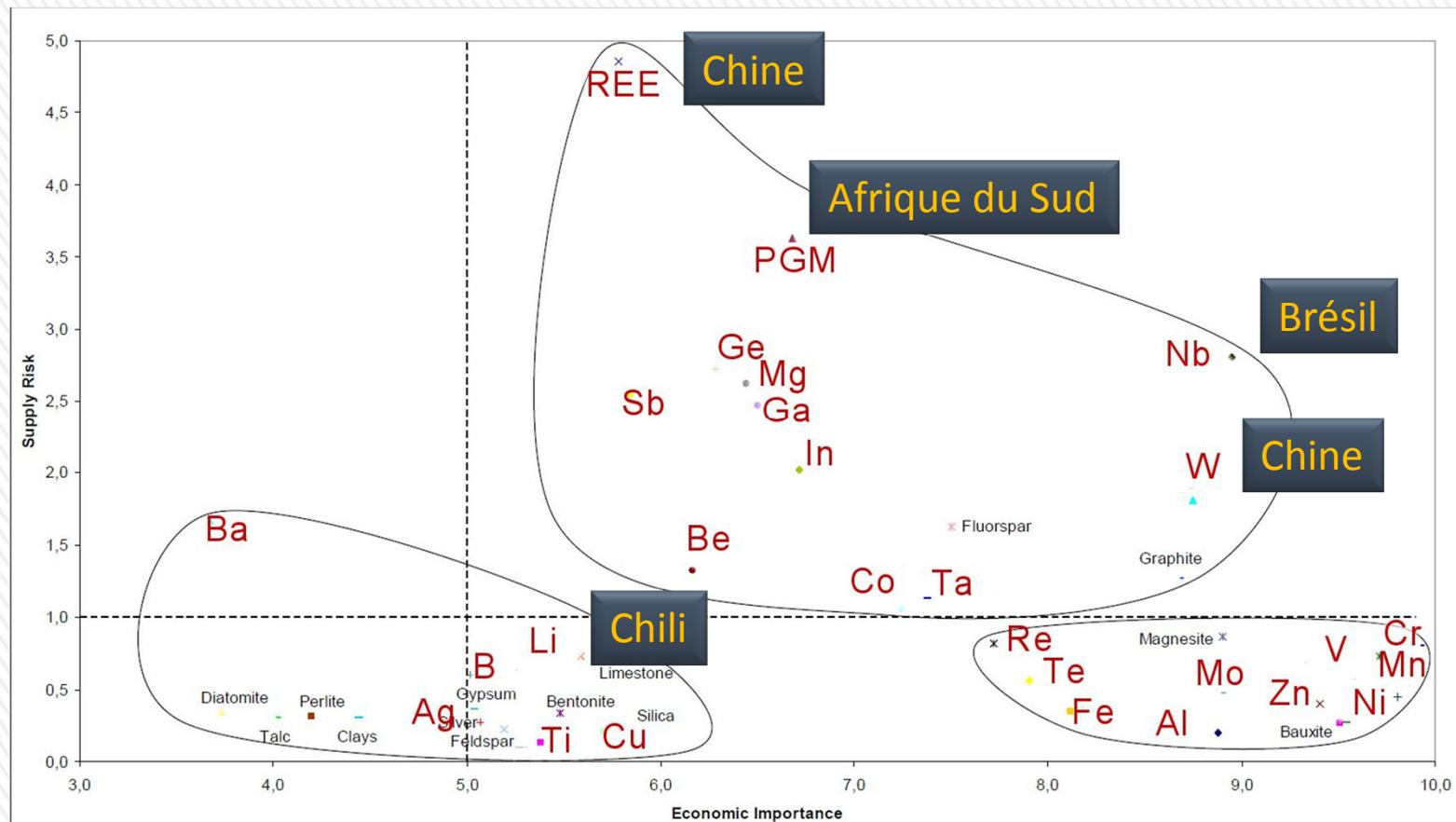


Métaux Critiques

Le syndrome des "Terres Rares"

► Critical Raw Materials for the EU (Jul '10)

- Risque d'approvisionnement vs. Impact économique





La Dimension Géologique

Rareté ou Ignorance?

Dimension Géologique

La géochimie de mon jardin

- ▶ Soit un jardin de 1000 m² sur 1m de profondeur
 - ▶ Contenu moyen de 2000 t de schiste

On y trouve surtout...

Élément	Contenu
O	930 t
Si	660 t
Al	160 t
Fe	60 t
Ti	8 t

et aussi...

V	164 kg
Cr	122 kg
Zn	150 kg
Ni	54 kg
Cu	46 kg



Dimension Géologique

La géochimie de mon jardin

- ▶ Soit un jardin de 1000 m² sur 1m de profondeur
 - ▶ Contenu moyen de 2000 t de schiste

On y trouve tout ce qu'il faut pour l'électronique de pointe ...

Li	60 kg
Nd	54 kg
Co	34 kg
Ga	34 kg
Gd	8 kg

et même...

As	22 kg
Hf	15,4 kg
Ge	3,4 kg
U	5,4 kg
Tl	1,2 kg
Hg	130 g
Au	2 g
Te	<2g



Dimension Géologique

De la roche au minerai

- ▶ Une **ROCHE** est un agrégat naturel de minéraux
- ▶ Un **MINERAI** est une substance solide formée dans l'**environnement naturel**, permettant une valorisation industrielle **actuelle** dans des conditions de rentabilité **économique**.



ROCHE
Tuf rhyolitique



MINERAI d'OR
Tuf rhyolitique à 1 g/t Au



Dimension Géologique

Du minerai au gisement

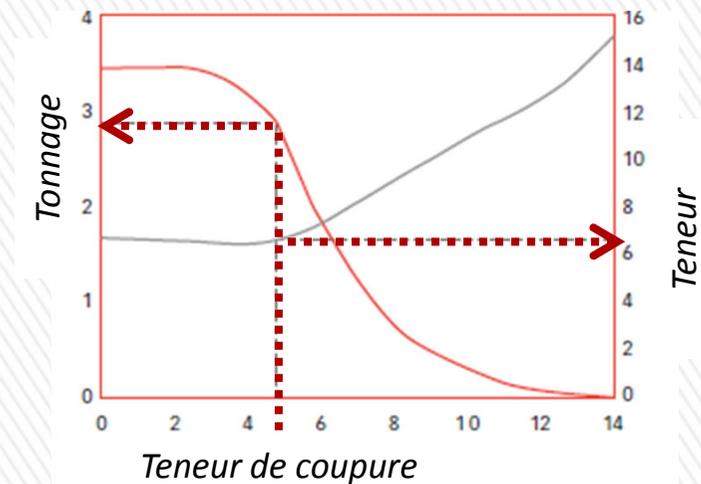
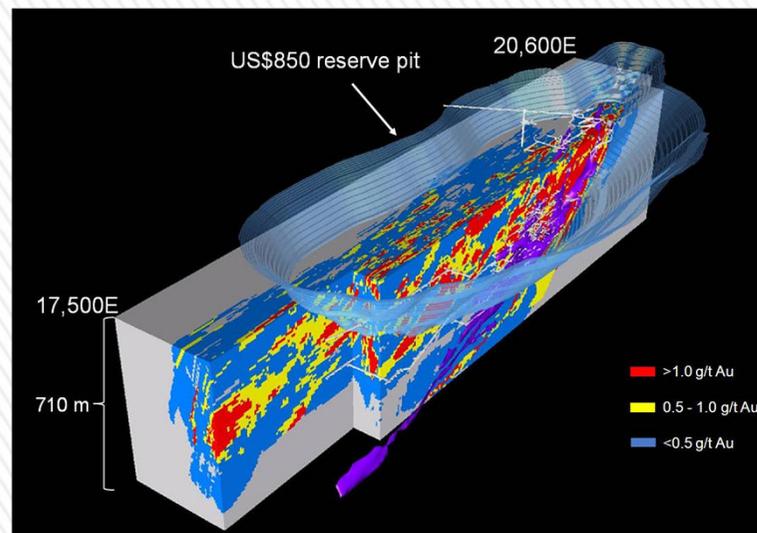
► Ressources

- Les volumes que les géologues ont pu **identifier et quantifier**

► Réserves

- Un sous-ensemble **exploitable** selon des critères

Techniques
Économiques
Sociaux
Environnementaux, ...



Dimension Géologique

La réponse européenne

- ▶ Resource Efficiency (European Innovation Partnership)
 - ▶ Développement de procédés innovants
 - Amélioration de la récupération
 - Elimination des impuretés
 - Automatisation
 - Tri avant broyage
 - Biométallurgie



RÉGION WALLONNE

C.O.G.O.L.I.N
WIST3 - 600k€





Dimension Géopolitique

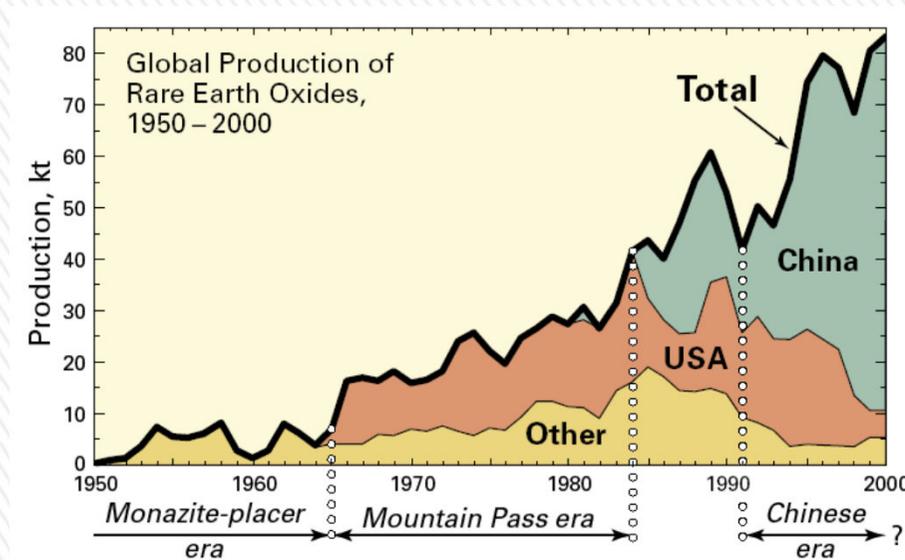
Pénurie ou incurie ?

Dimension Géopolitique

Terres Rares et Empire du Milieu

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
Lanthanides	Lanthanum	Cerium	Praseodymium	Neodymium	Promethium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutetium														
	138.9055	140.116	140.90765	144.24	(145)	150.36	151.964	157.25	158.92534	162.500	164.93032	167.259	168.93421	173.04	174.967														
	5.5769	5.5387	5.473	5.5250	5.582	5.6437	5.6704	6.1496	5.8638	5.9389	6.0215	6.1077	6.1843	6.2542	5.4259														

► Historique de la production 1950-2000



134 000 t en 2010

► 2010: > 95% assuré par le gisement de Bayan Obo (Chine)



Dimension Géopolitique

Terres Rares et Empire du Milieu

- ▶ Bayan Obo (Mongolie Intérieure)
 - ▶ 40MT à 4% REE [Bastnäsité: $(\text{Ce}, \text{La})\text{CO}_3\text{F}$]



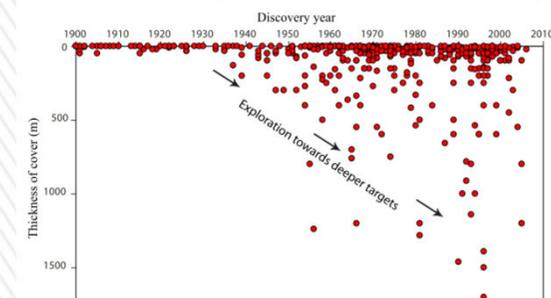
1km



Dimension Géopolitique

La réponse européenne

- ▶ Participation dans des projets étrangers
 - ▶ Mount Weld (Aus) **17,2 MT à 8,1 % REO** [Lynas & Solvay Rhodia]
- ▶ Développement du recyclage
 - ▶ Hydrométal recyclage de poudres de polissage, aimants permanents,...
 - ▶ CR³ à la KULeuven
- ▶ 3D Geology
 - ▶ Relance de l'exploration du sous-sol



Innovation en techniques d'exploration géologique.





Dimension Technologique

LED it be!

Ecrans, Diodes et Cellules PV

Une histoire éclairante

▶ Panneaux photovoltaïques

▶ Couches minces (3 μm) CIGS

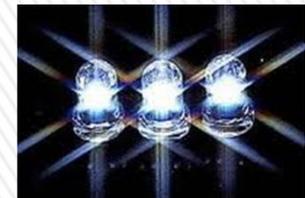
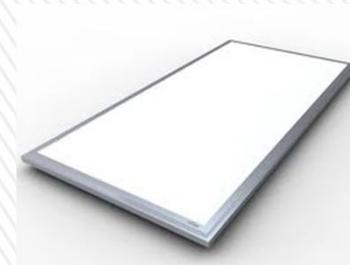
- Cuivre-Indium-Gallium-Selenium



▶ Rétroéclairage par panneaux LEDS

▶ Smartphones

▶ TV



▶ Eclairage public et domestique

▶ Mise au point de lampes LED (blanches) à haute puissance



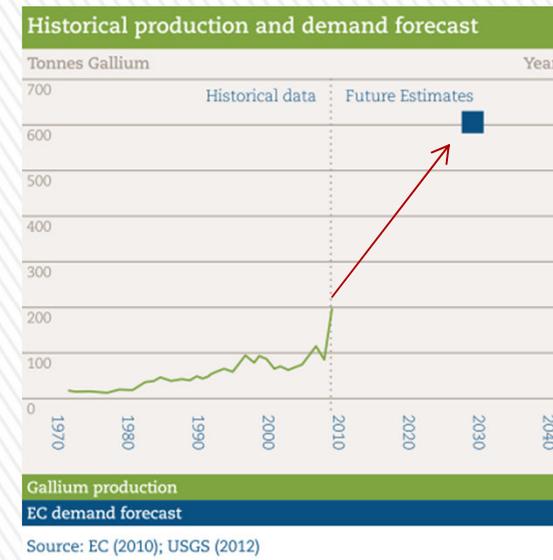
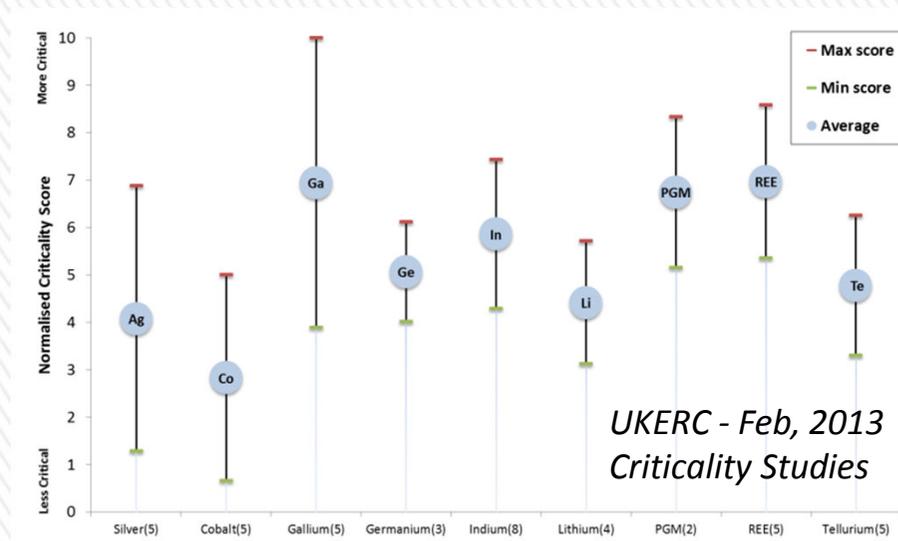
27 W = 100 W



Ecrans, Diodes et Cellules PV

Une histoire éclairante

- ▶ Consommation mondiale de Ga 216 t (40 t en 1986)
 - ▶ Prévision 2030 : 600 t
 - ▶ Co-produit de la production de l'Aluminium
 - 50 g/t de minerai (bauxite)
- ▶ Réserves mondiales inconnues...

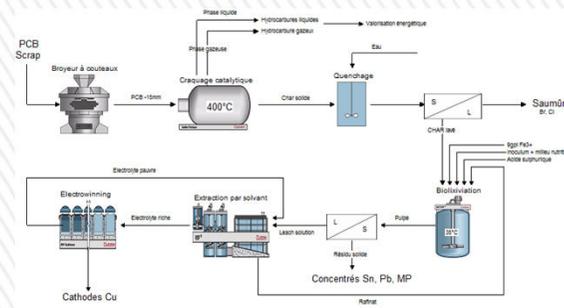


Ecrans, Diodes et Cellules PV

La réponse européenne

- ▶ Substitution
 - ▶ Autres technologies PV
- ▶ Amélioration des procédés
 - ▶ Ga dans la métallurgie du Zn, le charbon, ...
- ▶ Recyclage
 - ▶ Anticipation du recyclage des PV et DEEE

BioWEEE
PhD FRIA



+ Sn, Pb, MP,...





Boucler la boucle

Quand l'économie devient circulaire

Boucler la boucle

Les mines technosphériques

► DEEE: Déchets Electriques et Electroniques

► Circuits imprimés (PCB)

- 6% en masse des DEEE
- 500 000 t/an dans l'Europe des 27

► Composition

- Métaux de base (35%): Cu, Zn, Al, Pb, Sn, MP, ...
 - Métaux rares
 - » Au 100-1000g/t
 - » Ga 30g/t; In 30g/t; Nd 300g/t
- Céramiques (35%): fibres de verre, ...
- Polymères (30%): résine époxy, ...



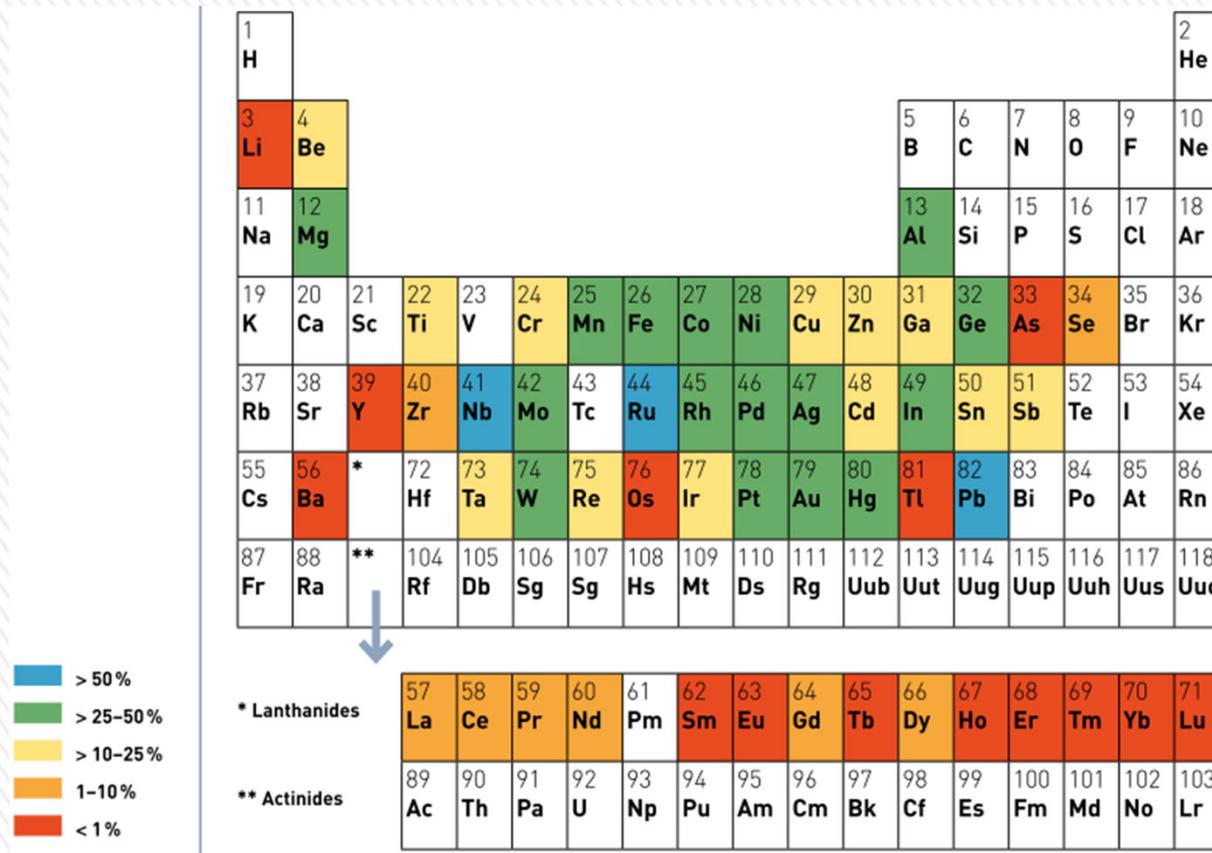
De Ressource à Réserve = Innover dans la collecte, le traitement, la valorisation.



Boucler la boucle

Les mines technosphériques

- Taux de recyclage des métaux (UNEP, 2011)





Conclusions

Métaux pour les technologies futures

Conclusions

Une opportunité pour l'innovation

- ▶ Il n'y aura pas de **(ré-)industrialisation** sans matières premières
 - ▶ Nécessité d'une réflexion stratégique européenne
- ▶ Les matières premières sont **autour de nous**
 - ▶ Relance du secteur minier et du recyclage (mines urbaines)
- ▶ Le **recyclage** est indispensable, mais
 - ▶ Nécessite un cadre (législatif,...) adéquat et ne répond pas à tous les besoins
- ▶ Le potentiel d'innovation est énorme
 - ▶ Géologie 3D; Robotique en mines; Biométallurgie; Eco-design;...
- ▶ Le BeNeLux doit être un acteur de premier plan
 - ▶ European Innovation Partnership, KIC, H2020

Knowledge Triangle = Enseignement, Recherche + Esprit Entreprise



Merci



Liège, Belgium



www.em-georesources.eu



Université de Liège - GeMMe - *Génie Minéral, Matériaux & Environnement*

