



# *Analyse critique des bonnes solutions au problème de la consommation exponentielle des ressources métalliques*

---

Anniversaire 10 ans ISF SystExt

**Doctorante** sur le coût social de l'épuisement des ressources (cas d'étude néodyme) à CentraleSupélec et au BASIC

Judith PIGNEUR

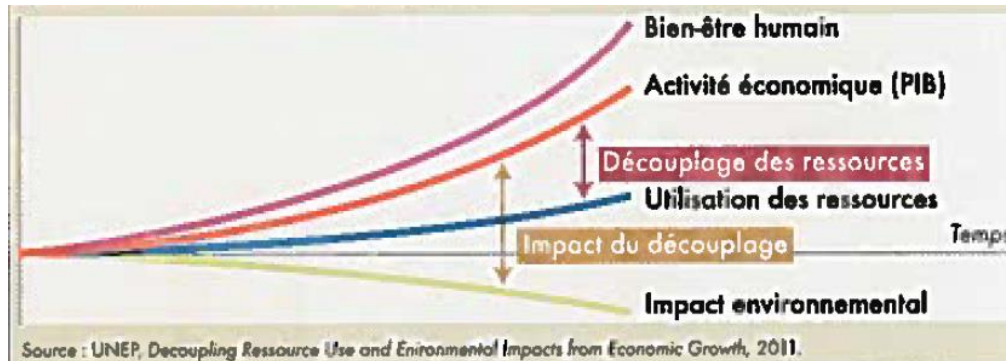
Membre d'ISF SystExt

# Introduction

- Prérequis : quels problèmes posent l'augmentation de la consommation?
  - Fin des stocks
  - Enjeux sociaux et environnementaux de l'extraction
  - Effet démultiplicateur de l'épuisement sur les impacts
- Quelles solutions?
  - Croissance verte / découplage (économique)
  - 3 R le fameux : Réduire/Réutiliser/Recycler
- Présentation de l'idée de solutions, quelques éléments techniques et politiques sur les difficultés posées par ces solutions.

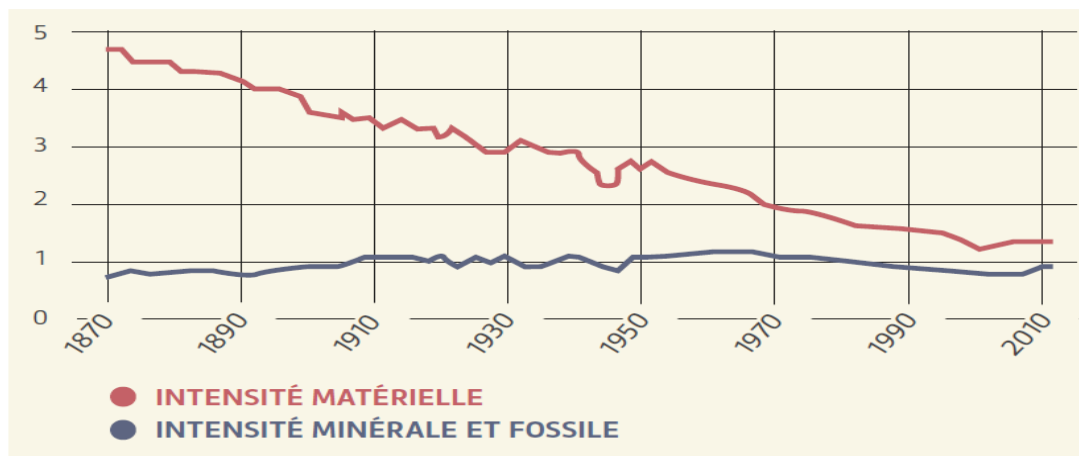
# Croissance verte et découplage

## Idée



Atlas mondial des matières premières, 2014

## Vision historique



Krausmann et al., 2014 ; Quantité de matière nécessaire pour produire un dollar (en kg)

## Moyens envisagés pour le découplage

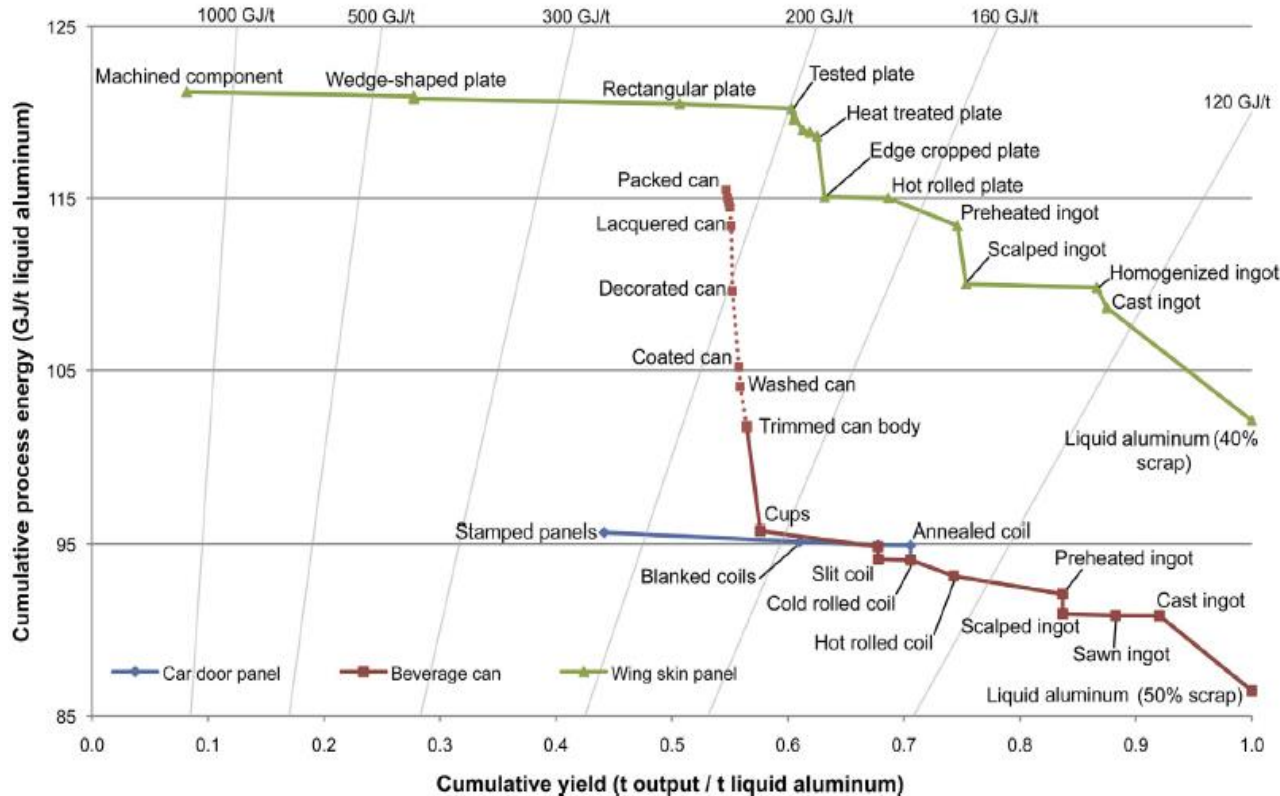
- Innovation verte : trade-off d'une MPM à l'autre
- Tertiariation de l'économie : Trade-off d'un pays à l'autre
- Illusion de la dématérialisation numérique : base matérielle de l'économie numérique : composants électroniques, data center, nouvelles infrastructures, etc.

Le mantra des 3R

# **RÉDUCTION/RÉUTILISATION/REC YCLAGE**

# Réduction

## Pertes : quelques chiffres



Allwood, 2014

- Néodyme : principale mine : 90% perdu à la première étape (source : auteur)

## Idées

- Diminution croissance/Stagnation/décroissance
- Réduction de la diversité/quantité des métaux utilisés dans les produits (Ecoconception)
- Réduction des pertes dans les processus de production
- Fin de la destruction des invendus

## Politique

- Destruction des invendus : campagne des Amis de la terre, Amazon : 3 millions de produits neufs sont détruits par Amazon chaque année, rien qu'en France

# Réutilisation/Réparation

- Idée : diminuer la consommation en favorisant la réutilisation et la réparation plutôt que l'achat de produit neuf
- Demandes politiques des associations environnementales :
  - prolongation des garanties
  - maintenir/favoriser l'existence des réparateurs
  - standardisation des pièces
  - lutter contre l'obsolescence
- Tension entre écoconception et innovation verte : mieux vaut-il un produit qui consomme un peu moins (d'énergie et de matériaux) avec un nouveau composant ou un produit qui réutilise les composants déjà existants?

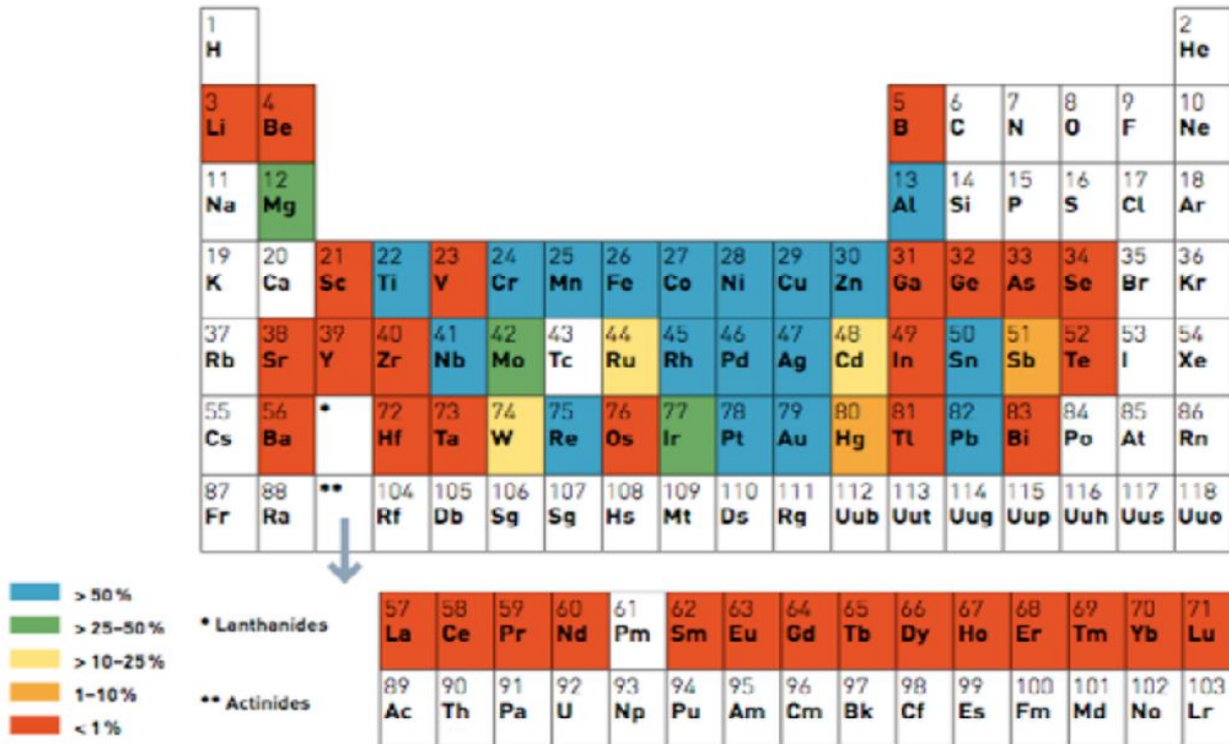
→ Quasiment inexistant.

Filière du néodyme : nouveaux aimants utilisant moins de dysprosium VS mêmes aimants (volonté d'innovation pour valeur ajoutée/incertitude sur la disponibilité du gisement secondaire/volonté de croissance)

→ Problème d'échelle pour assurer le remplacement des pièces

# Recyclage

## Quelques chiffres



## Idée

- Economie circulaire

## Limites

- Economique : le recyclage, comme la réutilisation ne permet pas la croissance
- Physiques
  - Perte de qualité (contamination spontanée)
  - Dissipation matérielle énergétique

Taux de recyclage fonctionnels moyens mondiaux en fin de vie (post-consommation) pour 60 métaux en 2011. Source : Ekins et al., 2017

# Recyclage

## Limites : organisation de filières et écoconception

- **Absence écoconception :**
  - miniaturisation (dans l'électronique par exemple)
  - dispersion (utilisation de l'antimoine comme retardateur de flamme)
  - alliage (une dizaine de métaux utilisés comme additifs dans l'acier)
  - conception de produits non aisément démontables (colles, etc.)
  - « mauvaises combinaisons » dans les produits Fe/Cu (perte de qualité/downcycling) : éviter l'aluminium et le magnésium
- **Conception des filières :**
  - Imbrication filière primaire et secondaire
  - gestion historiquement non efficace des déchets qui conduit à ne plus savoir où se situe un grand nombre de métaux
  - gestion « court-termiste » des déchets, basée sur le prix des métaux qui va engendrer une dispersion encore plus grande de ces métaux
  - cycle d'innovation très rapide ne permettant pas la mise en place de filière de recyclage
  - composition différente pour chaque entreprise concurrente ne permettant pas de centraliser



# Recyclage

## Politiques :

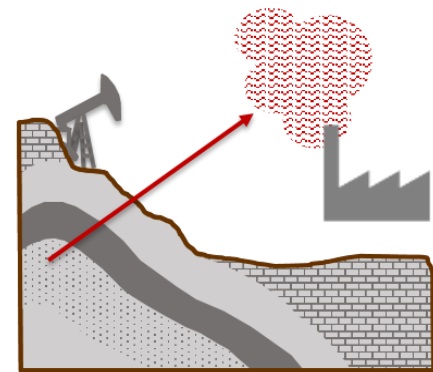
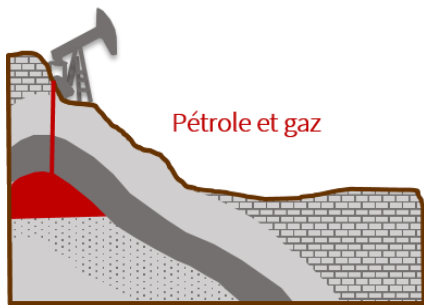
- Objectifs européens se basent sur la quantité de produits prise en charge et non sur la qualité du recyclage

par exemple un téléphone dont tous les composants sont dilués dans la filière de l'acier est considéré comme recyclé

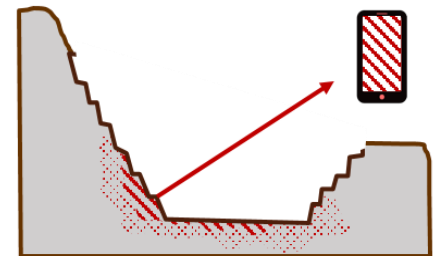
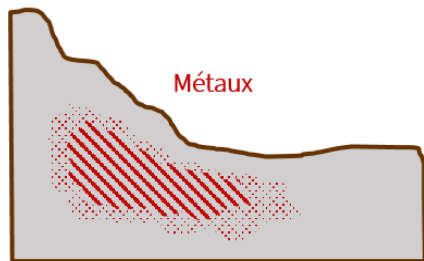
- Au Japon objectif matière → oblige les constructeurs à faire de l'écoconception (amélioration sur le démontage par exemple)

# Conclusion

- Tous foutus?
  - Ou vers un scénario/feuille de route pour prioriser les usages des métaux (besoins essentiels, transition énergétique, etc.) et comment assurer un approvisionnement le plus soutenable possible (via les 3R)?
- Vers un scénario NegaMINES (ou NémaMat)



Epuisement du  
gisement  
primaire



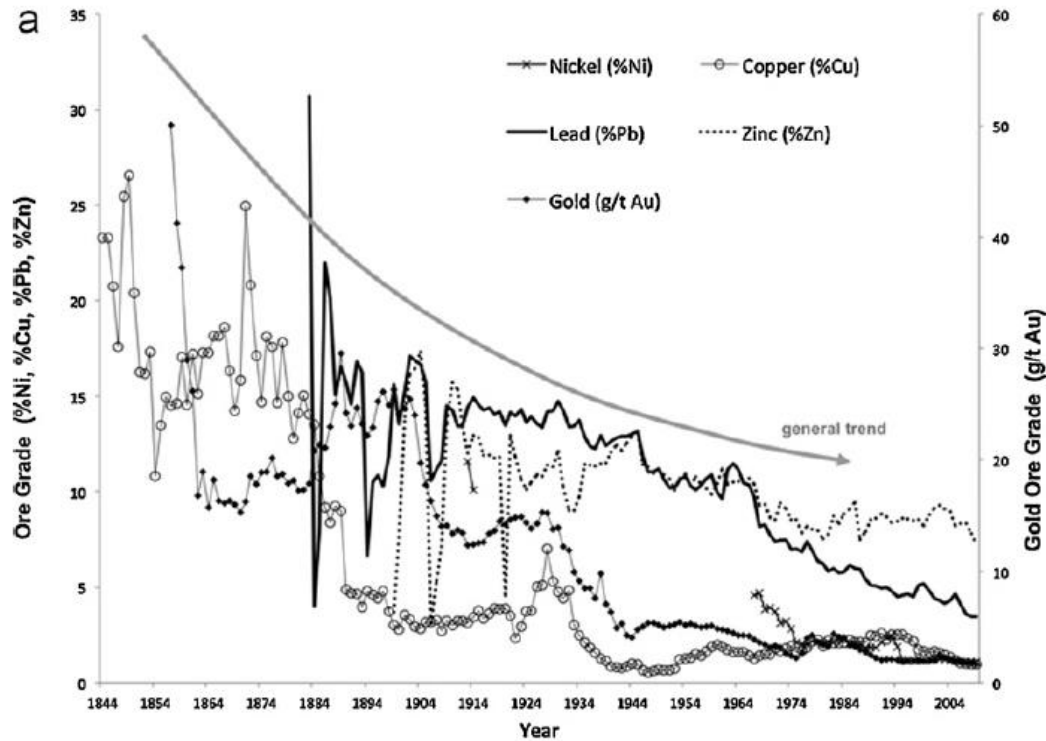


Figure 7 : Déplétion des teneurs de différents minerais depuis 1834 en Australie. Source : Prior, 2012  
 Les teneurs du minerai en or sont données sur l'axe de droite en ppm, les autres teneurs sont données en % à gauche

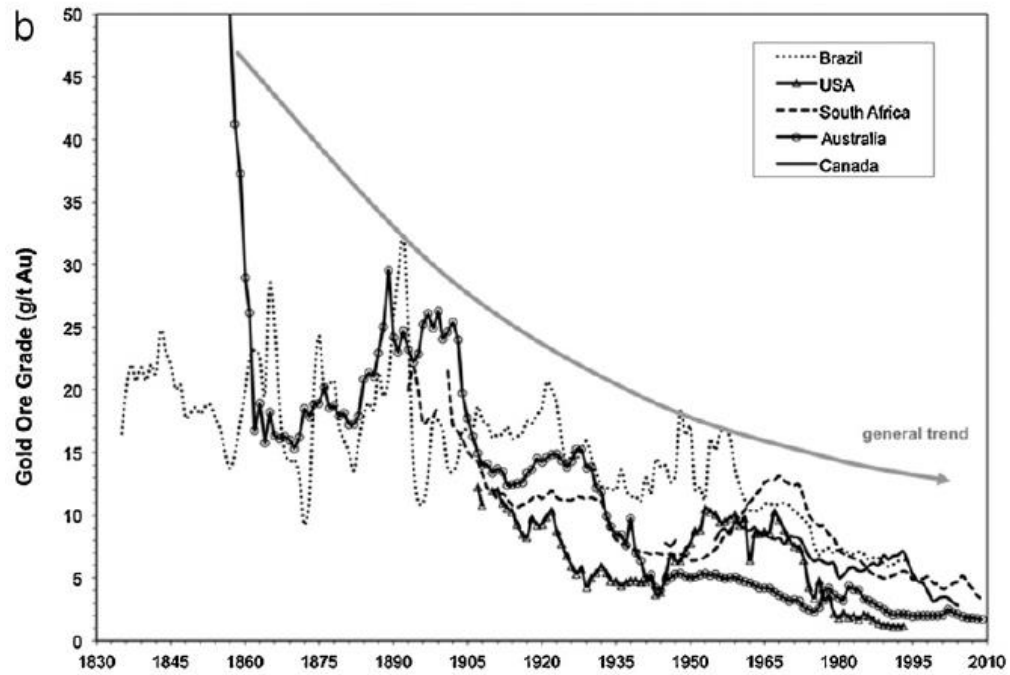
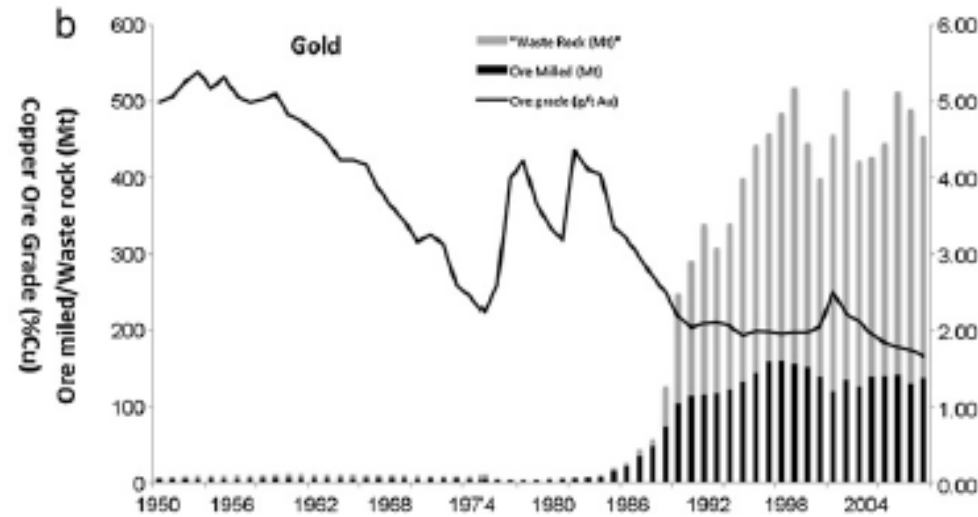
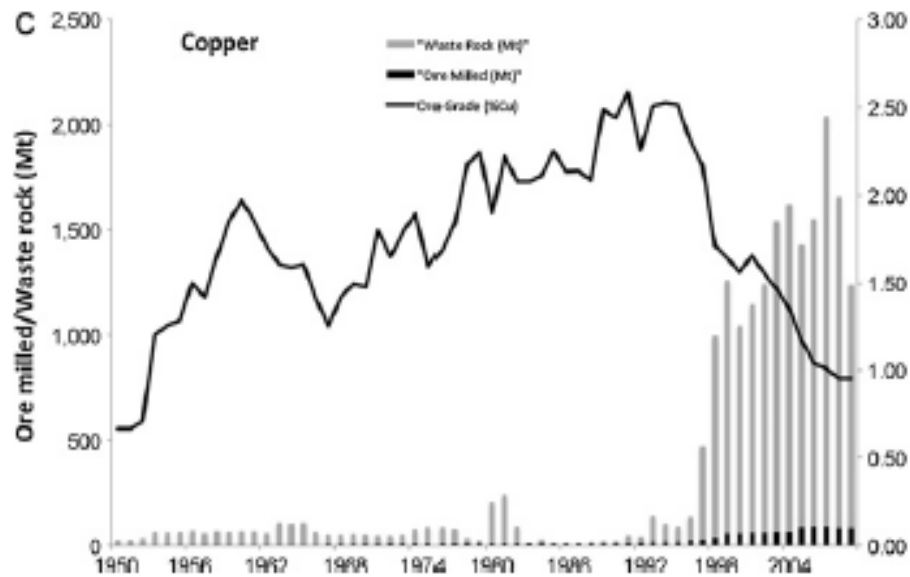


Figure 8 : Déplétion des teneurs de minerais aurifères dans différents pays du monde depuis 1830 Source : Prior et al., 2011

# Introduction

Teneur, minerai broyé, déchets, évolution depuis les années 1950 en Australie (Prior, 2012)



(Prior 2012)

# Introduction



Palabora Mine, Afrique du Sud, 5 à 10 millions de tonnes extraites par an (concentration en Cu métal environ 0,5%) Source: [Dillon Marsh](#)

Catégorie	Source	Description	Sous-catégories	MPM concernées (en gris les ressources non métalliques)				
MPM critiques	(Ad-hoc Working Group on defining critical raw materials, 2014)	MPM dont le risque d'une pénurie économique européenne, et l'impact économique sont élevés : 1) Risque d'approvisionnement : stabilité politique et économique des pays producteurs où la production est concentrée, substituabilité, et taux de recyclage UE. 2) Impact économique : la somme des valeurs ajoutées des secteurs utilisant cette ressource pondérée par la part relative de ce secteur dans l'utilisation de la ressource. L'appellation « stratégique » est réservée au secteur militaire		Be	Borates	Charbon coke	Co	
				Cr	Fluorine	Ga	Ge	
				Graphite	In	Magnésite	Mg	
				Nb	PGM	Phosphates	Sb	
				Silice	Ta	TR	W	
Grands métaux industriels	(Bihoux & de Guillebon, 2010; Intervention C. Hocquard in Kert & Birraux, 2011)	Métaux exploités à plus d'un million de t/an. Sont également souvent classés comme tels ceux à plus de 200 000 t/an (Sn, Mg, Mo). Le chiffre d'affaire de leur exploitation est très élevé. Ils sont majoritairement utilisés dans la construction, les équipements mécaniques et électriques. Les métaux ferreux sont utilisés majoritairement dans le secteur de l'acier. Ces métaux (à part Mo), étaient déjà utilisés avant les années 1970.	Métaux ferreux	Cr	Mn	Mo	Ni	
				Fe	Si			
			Métaux de base	Al	Co	Cu	Mg	
				Pb	Sn	Zn	Ti	
Métaux précieux et petits métaux	(Arndt et al., 2010; Bihoux & de Guillebon, 2010; Hocquard & Lefebvre, 2015)	Métaux d'une grande valeur économique. Cette catégorie est fluctuante selon les époques. La catégorie des petits métaux est constituée par tous les autres éléments métalliques. Elle présente un tonnage, et donc un « chiffre d'affaires très faible », mais une forte valeur ajoutée et une grande importance économique, « en particulier pour les nouvelles filières industrielles » (usage dans l'électronique, les énergies renouvelables, etc.). Ces métaux sont pour beaucoup d'usage récent (sauf W, Hg, Bi, Sb,...), c'est-à-dire postérieur aux années 1970, et présente des gisements de teneurs plus faibles que les grands métaux industriels. Sont utilisés de manière quasi synonyme les appellations : rares, mineurs, high-tech, verts, exotiques, technologiques.	Métaux précieux	Ag	Au	PGM		
			Petits métaux	Be	Bi	Cd	Co	
				Ga	Ge	Hf	Hg	
				In	Li	Nb	Re	
				Sb	Sr	Ta	Tl	
				Te	TR	V	W	
				Zr				

Les catégories sont variables d'un auteur ou d'un organisme à l'autre : par exemple le niobium (Nb) et le vanadium (V) sont souvent classés dans les métaux ferreux, car ils sont très utilisés pour produire des alliages, mais ils sont classés dans les petits métaux ici, car leur production est inférieure à 200 000 tonnes par an.



## 1. Production et classification

### Les métaux industriels, une réalité industrielle et économique :

- >1Mt/an
- Fe, Al, Cu, Zn, Ni, Pb, Si, Ti, Mn, Cr.
- Sont également souvent par an : Sn, Mg, Mo.
- Le chiffre d'affaire tiré de l'exploitation de ces métaux est très élevé. classés dans cette catégorie les métaux exploités à plus de 200 000 tonnes
- majoritairement utilisés dans la construction, les équipements mécaniques et électriques, et les métaux ferreux sont utilisés majoritairement dans le secteur de l'acier. Ces métaux, mis à part le molybdène, étaient déjà utilisés avant les années 1970 (Bihouix and de Guillebon, 2010).

## 2. Critique et stratégique quesquo

- **Métaux Critiques (Union Européenne)**
  - Recoupe la catégorie des « petits métaux »
  - **rapports 2010 et 2014 suite à RMI**
  - "critical" when the risks of **supply shortage** (supply risk + an environmental country risk + substituability) et leur impact économiques (valeur ajoutée dun marché sur la part de ce marché dans l'utilisation de la ressource : These proportions are then combined with the megasectors' gross value added (GVA) to the EU's GDP) are higher than for most of the other raw materials. (à 10ans avec modèle augmenation conso non précisé) puis 30?

## 2. Critique et stratégie quesauquo

- Stratégique = militaire
- Sorti du débat public
- Probablement pourtant une influence majeure dans les choix de “diplomatie économique”

Conclusion : les critères sont purement économique ou militaire (pas question d'épuisement ou d'aspect sociaux)

### 3. Les métaux et la transition énergétique : mythe ou réalité ?

- Aujourd'hui Nd : env. 10% en 2010 (Constantinides, 2012) des usages sont utilisés pour l'éolien

