



RÉPUBLIQUE  
FRANÇAISE

Liberté  
Égalité  
Fraternité



Géosciences pour une Terre durable

brgm

# RECYCLAGE DES MÉTAUX – LIMITES ET OPPORTUNITÉS

Yannick Ménard (avec la contribution de Patrick D'Hugues)

CRESITT – Séminaire Éco-conception et électronique – Orléans – 18/10/2022



# BRGM

(bureau de Recherches Géologiques et Minières)

- Etablissement français de référence pour les applications des sciences de la Terre pour gérer les ressources et les risques du sol et du sous-sol.
- Service Géologique National

## ÉTABLISSEMENT PUBLIC

à caractère industriel et commercial (EPIC), créé en 1959

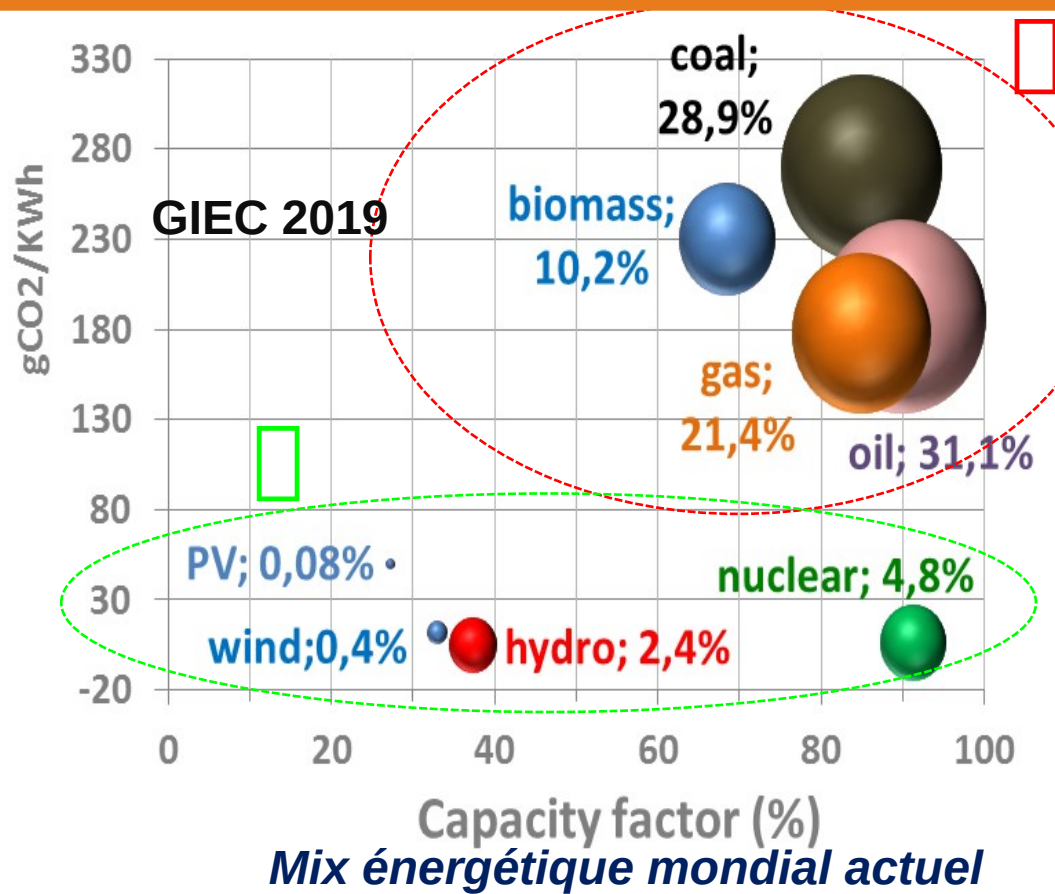
*le BRGM est placé sous la tutelle du ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation, du ministère de la Transition écologique et solidaire et du ministère de l'Économie et des Finances.*

- **Plus de 1000 salariés** (700 chercheurs et ingénieurs)
- Laboratoires et plateformes expérimentales localisés principalement à **Orléans**
- 18 directions régionales
- Plus de **90 doctorants**



- Recherche Scientifique (35%)
- Appui aux Politiques Publiques (35%)
- Commercial France & international (10%)
- Gestion des anciens sites miniers (20%)

# Pour limiter l'ampleur du changement climatique, il faut une révolution énergétique et la réduction des GES



## Les clés de la transition énergétique

- des consommations
- efficacité énergétique
- réseau intelligent et capacités de stockage
- énergies bas-carbone

(rapport 2015)

Pour un même quantité d'énergie  
Eolienne + PV vs. centrale énergie  
fossile

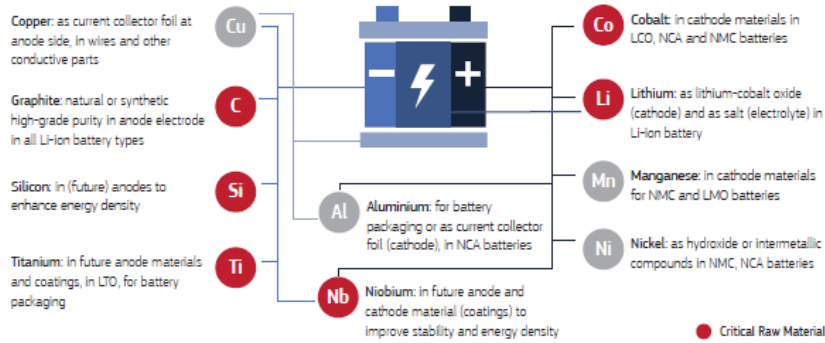


- 15 x plus de béton
- 90 x plus d'aluminium
- 50 x plus de cuivre

De la dépendance au pétrole à la dépendance  
aux métaux

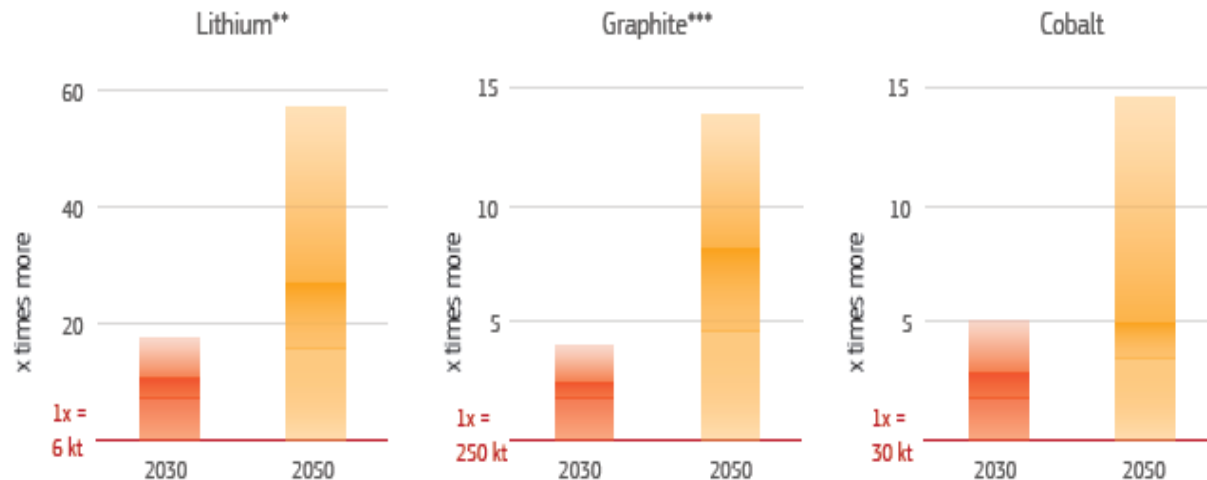


# Les énergies renouvelables et la mobilité électrique sont très consommatrices de matières premières minérales et métalliques

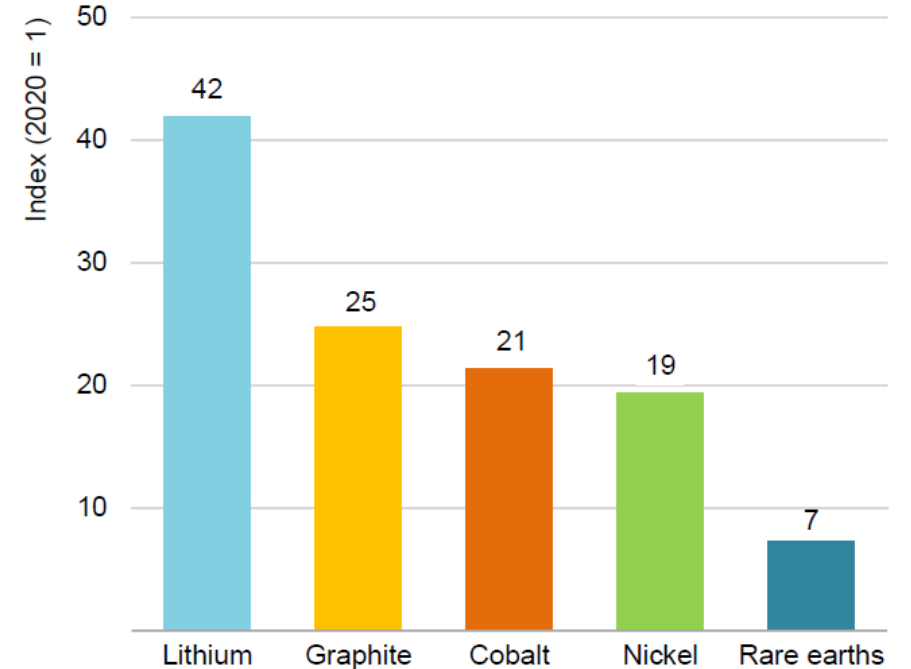


## European Commission - Critical Raw Materials in Technologies and Sectors foresight (2021)

Additional material consumption batteries, fuel cells, wind turbines and photovoltaics in renewables and e-mobility only in 2030/2050 compared to current EU consumption\* of the material in all applications



## Growth of selected minerals, 2040 relative to 2020



IEA. All rights reserved.

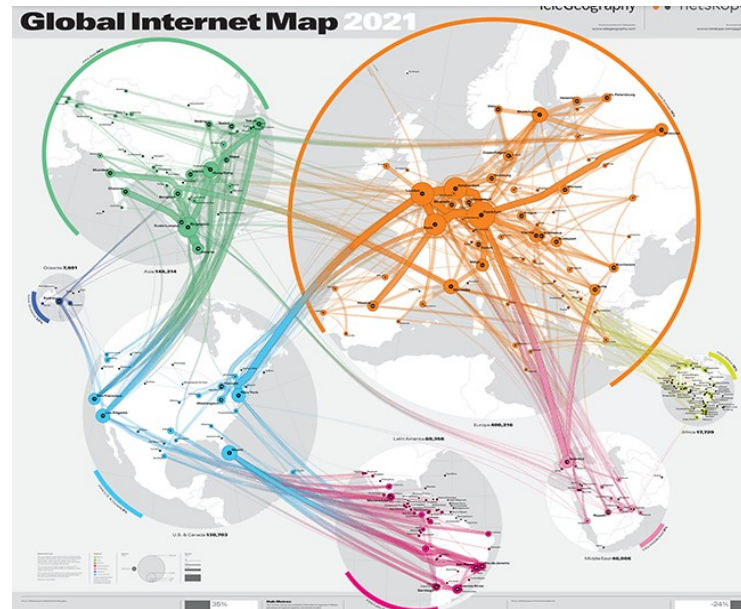
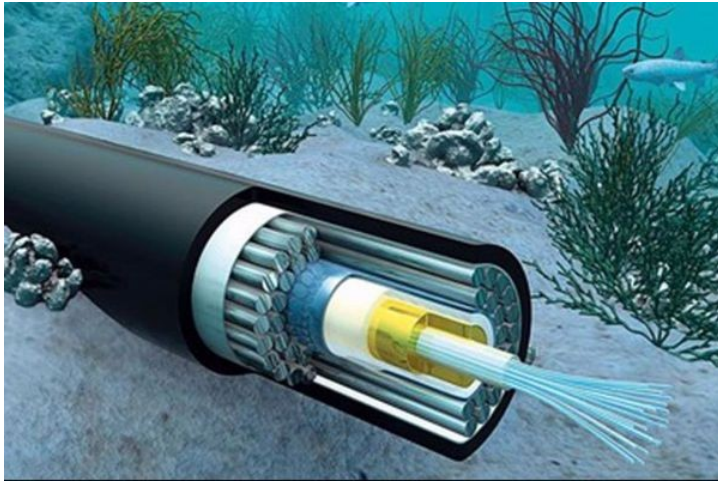
Agence Internationale pour l'Energie  
(Sustainable Development Scenario 2040)  
X 42 pour Li ; X 20 pour Co et Ni ; X 7 pour TR

# La dématérialisation et l'avènement du numérique repose sur une infrastructure physique

Développement rapide de l'infrastructure internet et explosion des data et les datacenters

## Le digital :

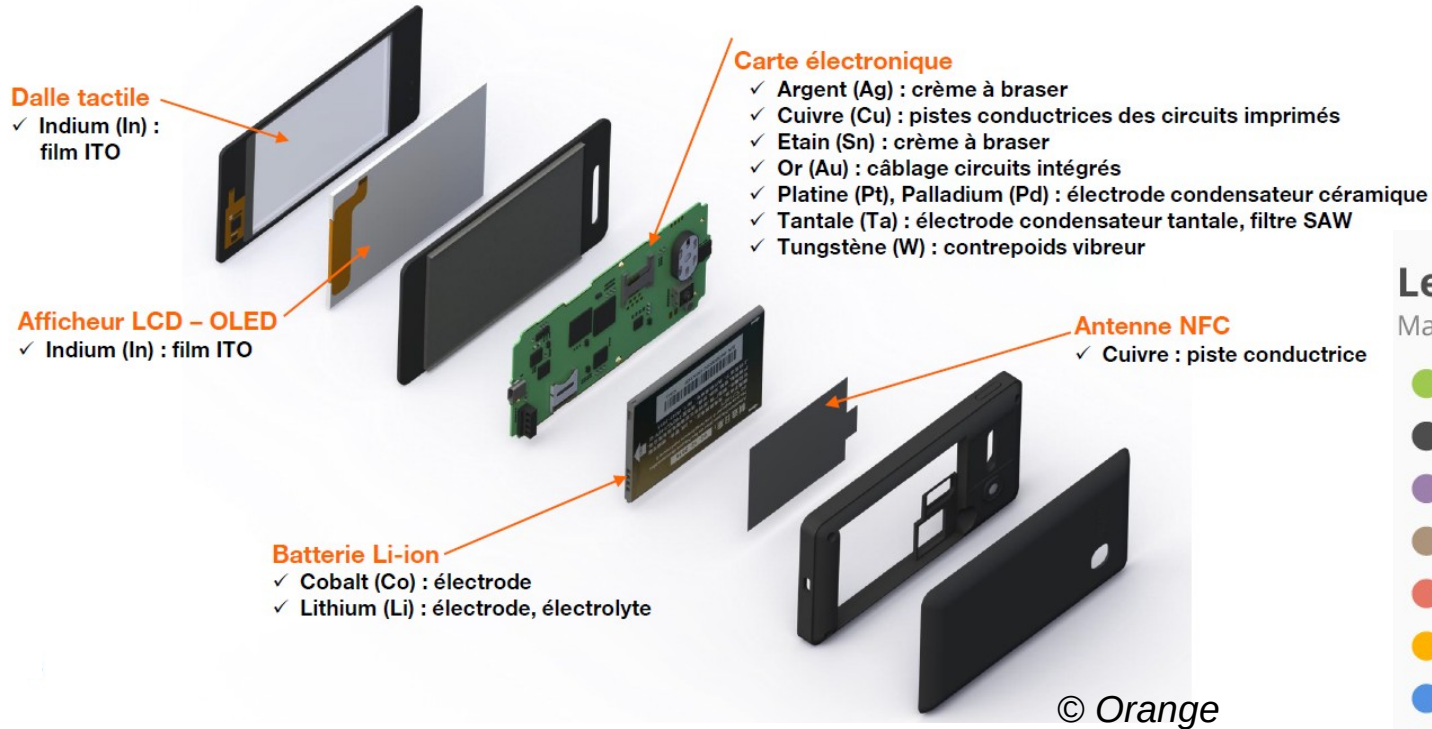
- C'est une forte consommation énergie
- Aujourd'hui c'est ~ 4-5% énergie mondiale,
- Selon scénarios, 21% de la consommation électrique en 2030 (45% liés à la fabrication, 55% à leur utilisation)



## Le digital :

- C'est une forte consommation en matériaux (directe et indirecte)
- Le réseau optique terrestre et sous-marin c'est 1,3 Millions de km en 2021)
- Des câbles optiques sous-marin
  - 7 matériaux principaux de structures (99,99% de la masse du câble) + Fibre optique restant dont le cœur dopé au germanium
- Des serveurs et des objets connectés riches en métaux

# Des objets de plus en plus complexes et riches en métaux divers

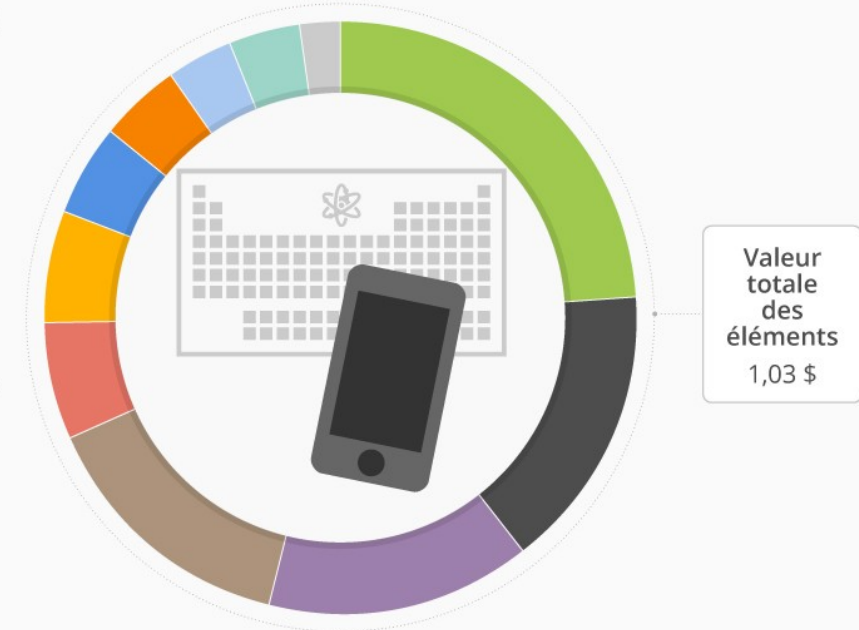


1 téléphone = 50 - 200 kg de minerai en fonction des métaux et des mines

## Les matériaux qui se cachent dans l'iPhone

Matériaux utilisés pour la fabrication de l'iPhone 6 (modèle 16 GB)

31,1 g	Aluminium
19,9 g	Carbone
18,7 g	Oxygène
18,6 g	Fer
8,1 g	Silicone
7,8 g	Cuivre
6,6 g	Cobalt
5,5 g	Hydrogène
4,9 g	Chrome
4,9 g	Autres
2,7 g	Nickel
129,0 g	Total



CC BY ND  
@Statista\_FR

Données arrondies.  
Source : 911 Metallurgist

statista

# Une demande en métaux/matériaux qui augmente avec nos modes de vie

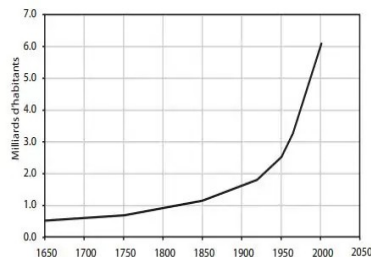


Transition énergétique

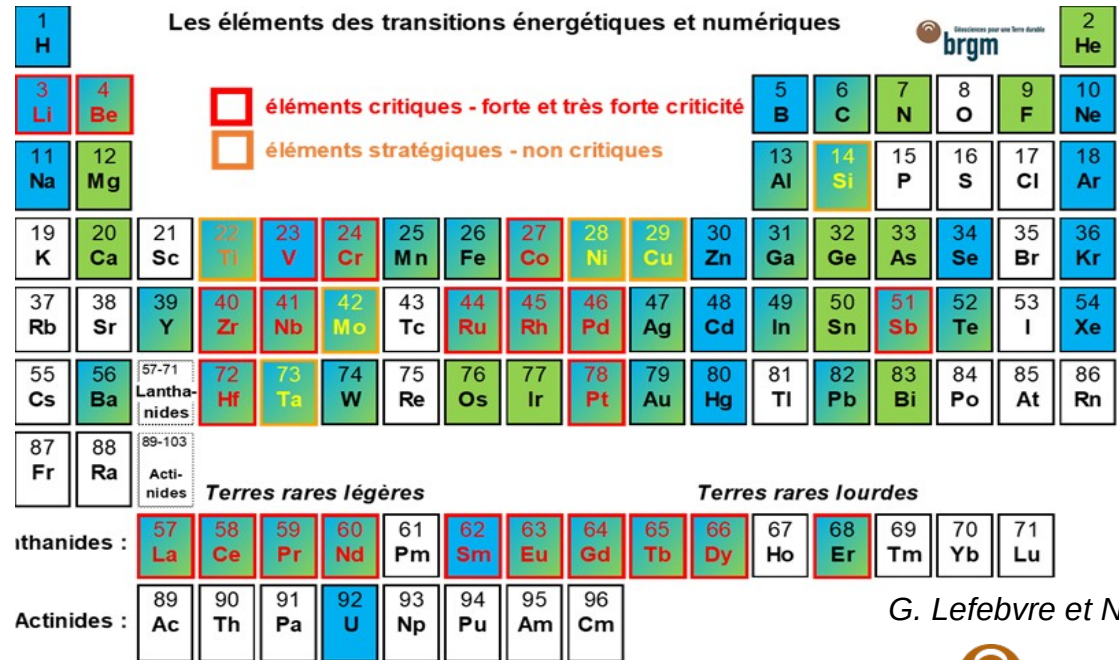
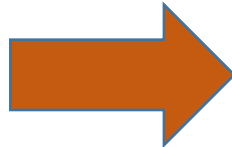
- Nouvelles technologies très gourmandes en ressources minérales
- Des objets de plus en plus complexes et des évolutions technologiques permanentes
- Une demande qui augmente en quantité mais aussi en diversité pouvant entraîner des conflits d'usage et des ruptures d'approvisionnement (criticité)



Transition numérique



Croissance économique et de la population



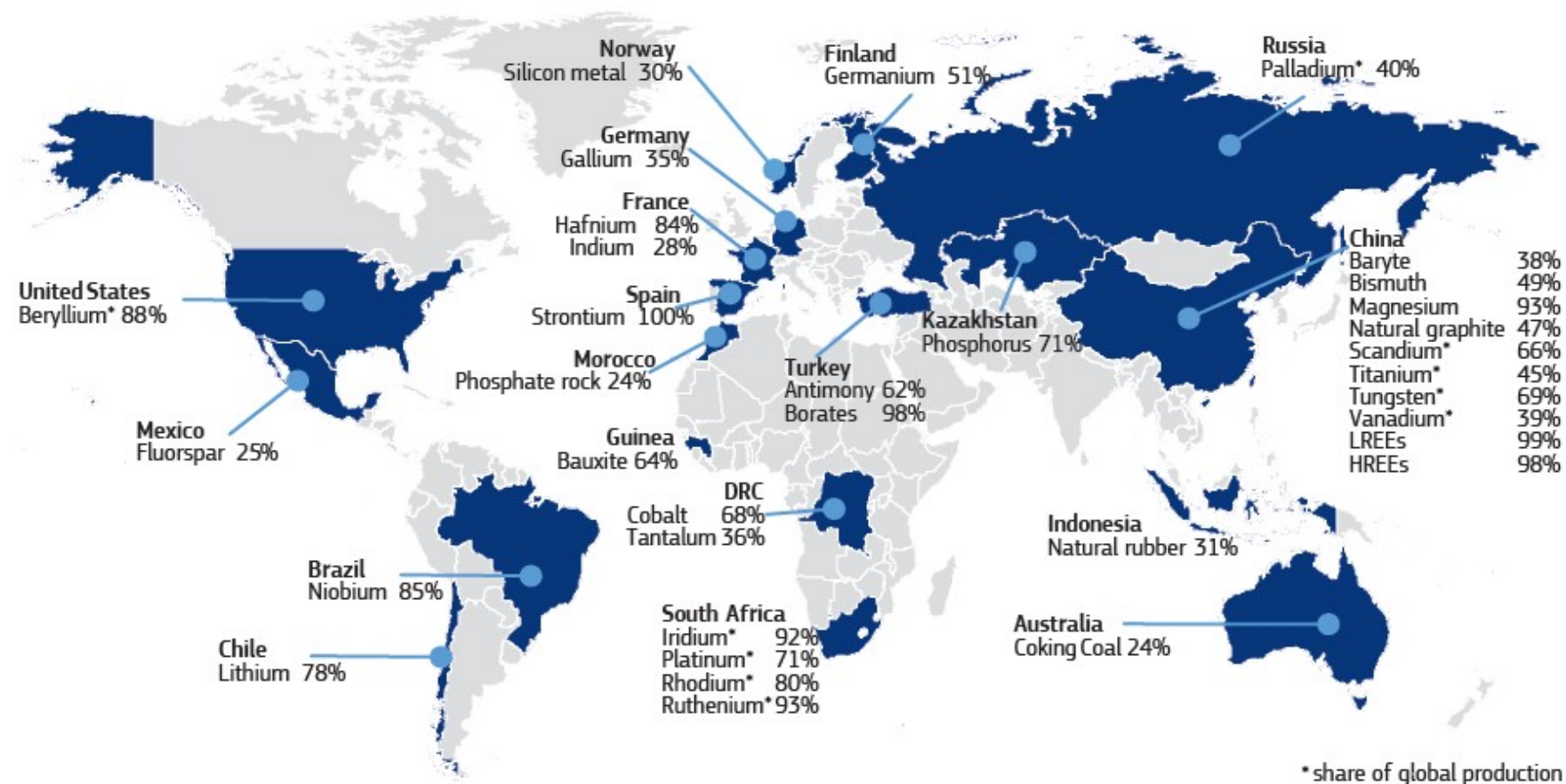
G. Lefebvre et N. Charles

Transition énergétique

Transition numérique

# L'Europe reste fortement dépendante des importations en ressources minérales

Figure 5: Global suppliers of EU critical raw materials<sup>46</sup>

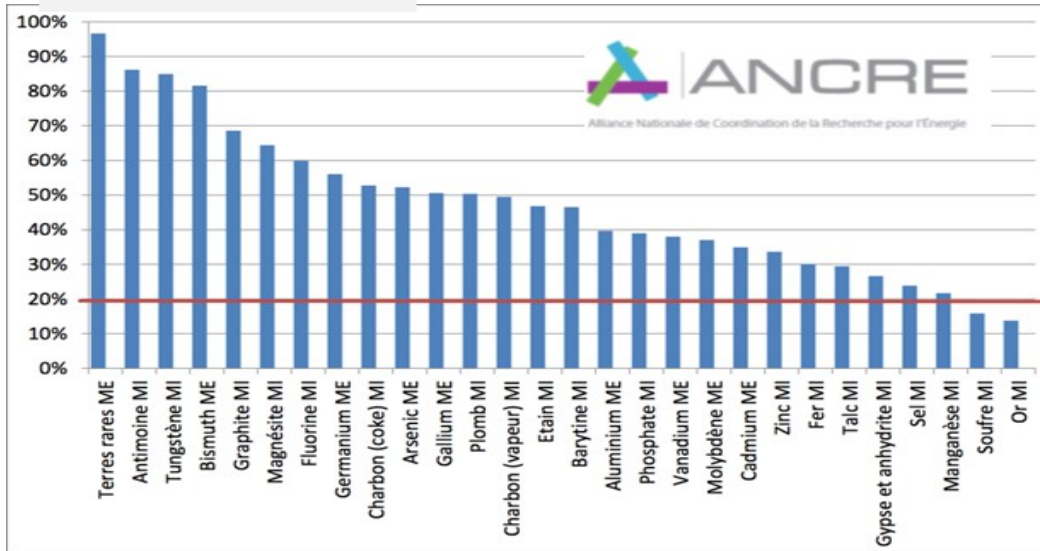
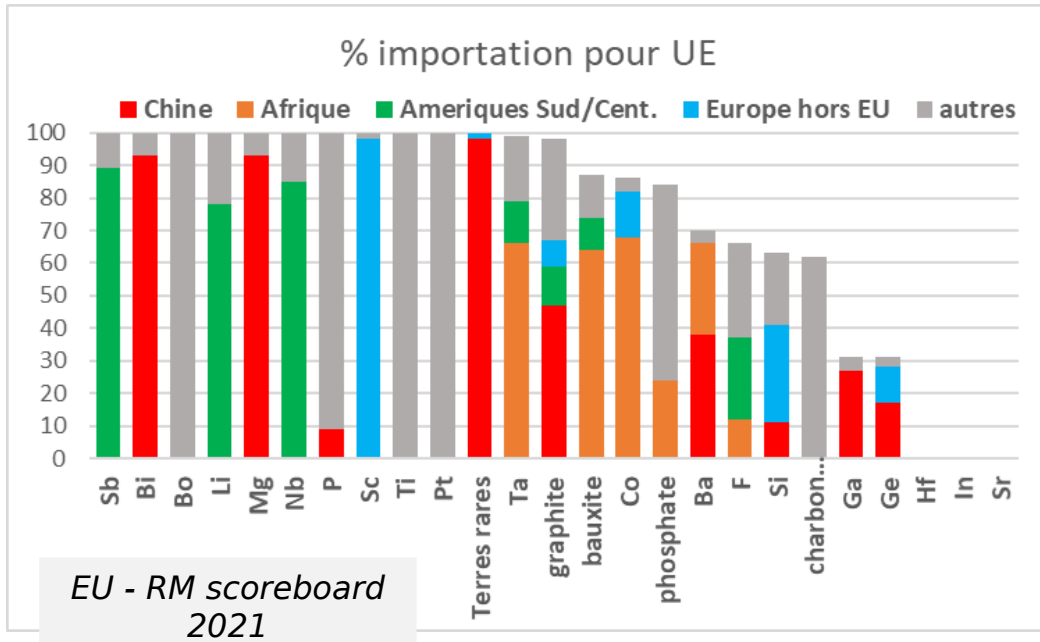


- 78% du Li Européen provient du Chili,
- Plus de 70% des Platinoïdes d'AFS
- Plus de 70% du Cobalt de RDC
- et 99% des TR de Chine

Origine des *matières premières critiques* utilisées en *Europe (RM scoreboard 2021)*



# Une forte dépendance Européenne aux métaux « venus d'ailleurs »



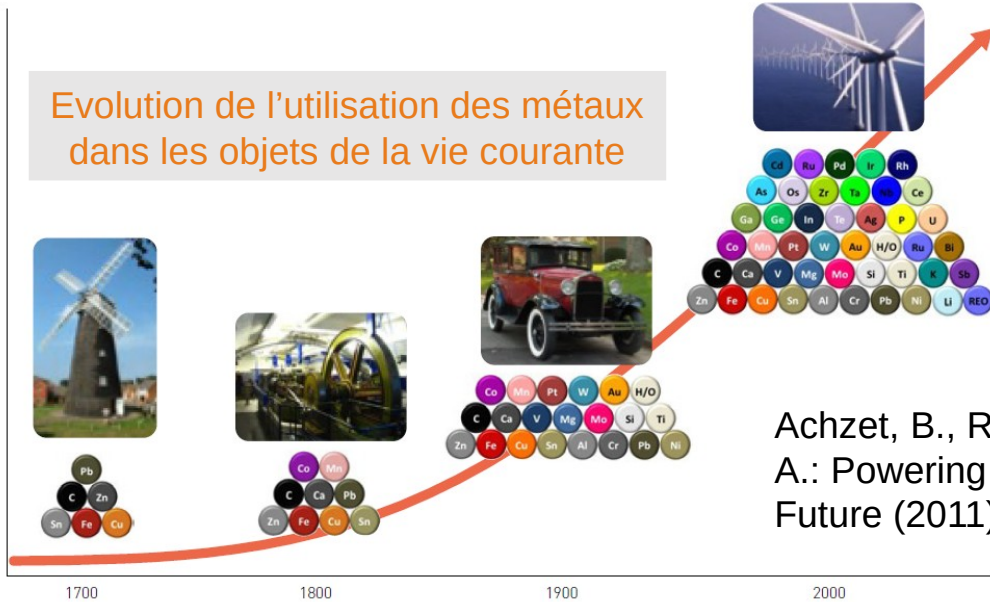
Production Minière [MI] ou Métallurgique de la Chine [d'après Rapport Ancre 2015 ; ressources minérales et énergie]

- Eu dépendante à des importations à plus de 50% pour une 20aines de substances
- La Chine est le 1<sup>er</sup> producteur minier et/ou métallurgique mondial de plus d'une trentaine de Matières Premières Minérales (depuis longtemps !)
- Activités extractives et de premières transformations ont été progressivement transférées vers des pays à bas coût de main d'œuvre et moins regardants sur les impacts environnementaux

# Des gisements de déchets de composition évolutive et toujours plus complexes

Les objets de la vie courantes sont des assemblages de matériaux utilisés pour répondre à différentes fonctions. Ces assemblages s'apparentent à des matrices complexes, difficilement recyclables et dont les compositions évoluent rapidement

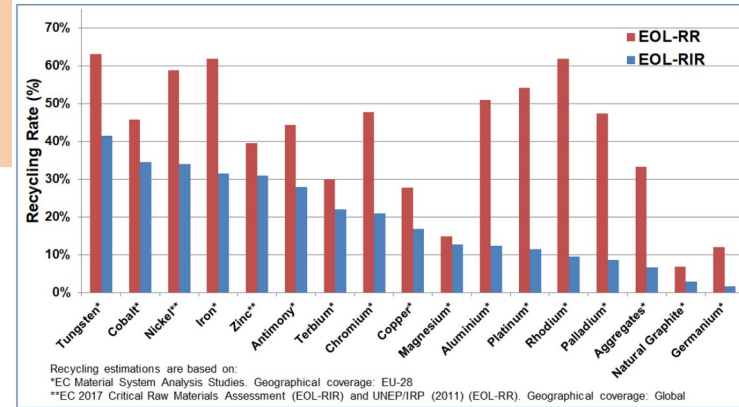
Evolution de l'utilisation des métaux dans les objets de la vie courante



Achzet, B., Reller, A.: Powering the Future (2011).

Intégrer des notions de recyclabilité dans la production des équipements

Développer des procédés de recyclage flexibles capables de « digérer » différents gisements

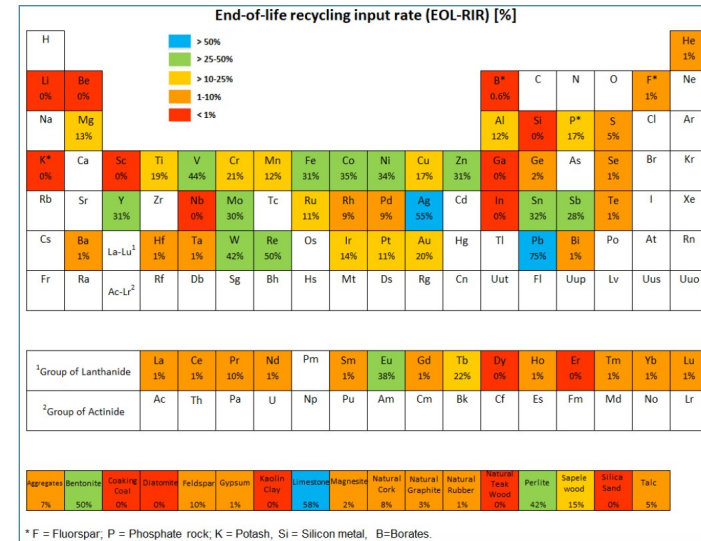


Recycling estimations are based on:  
 \*EC Material System Analysis Studies. Geographical coverage: EU-28  
 \*\*EC 2017 Critical Raw Materials Assessment (EOL-RIR) and UNEP/IRP (2011) (EOL-RR). Geographical coverage: Global

De quoi parle t-on ?

De taux de recyclage d'un métal (RR) ?

OU de taux de réincorporation d'un métal recyclé dans un équipement (RIR) ?

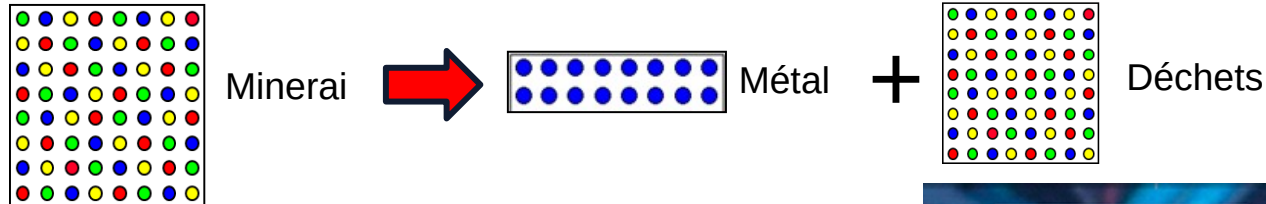


JRC (2017)

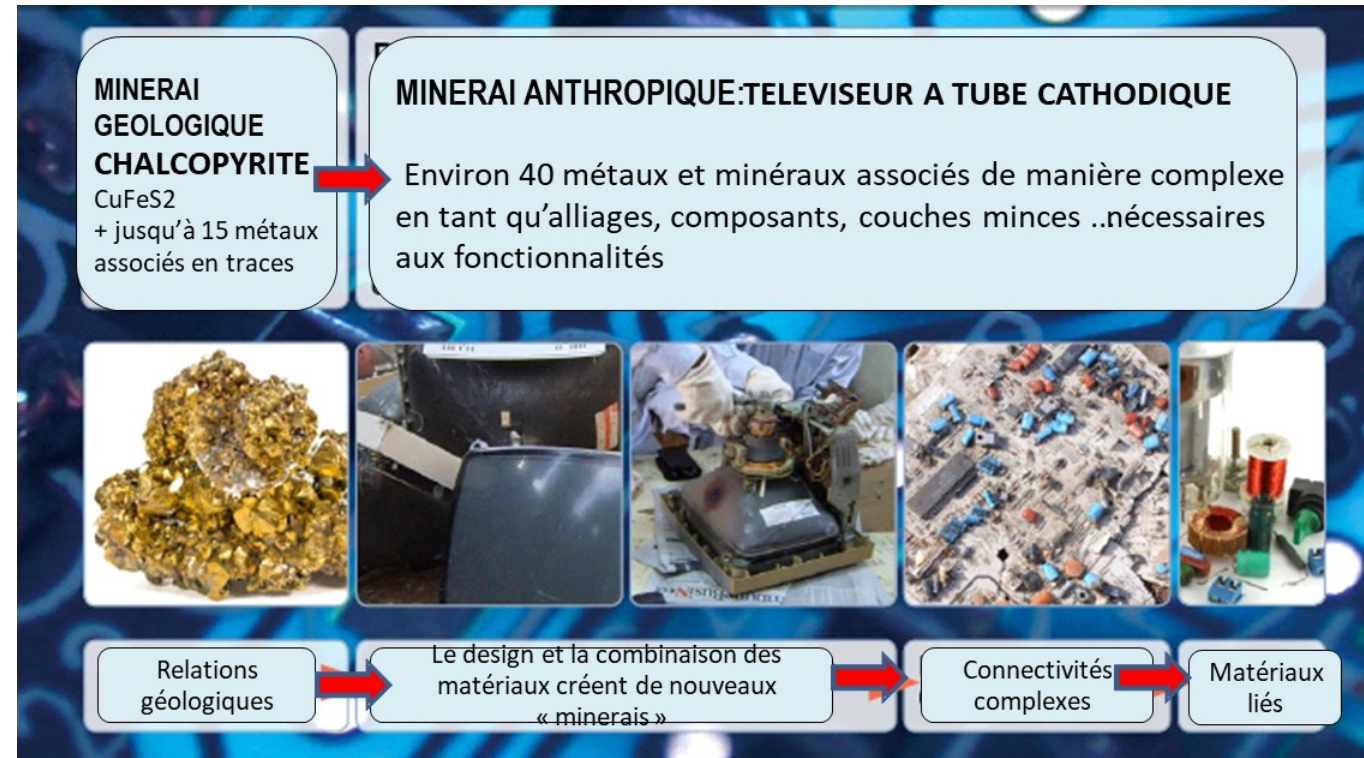
\* F = Fluorspar, P = Phosphate rock, K = Potash, Si = Silicon metal, B=Borates.

# Recycler ça commence par maîtriser les hétérogénéités de la matière liées aux cycles de production

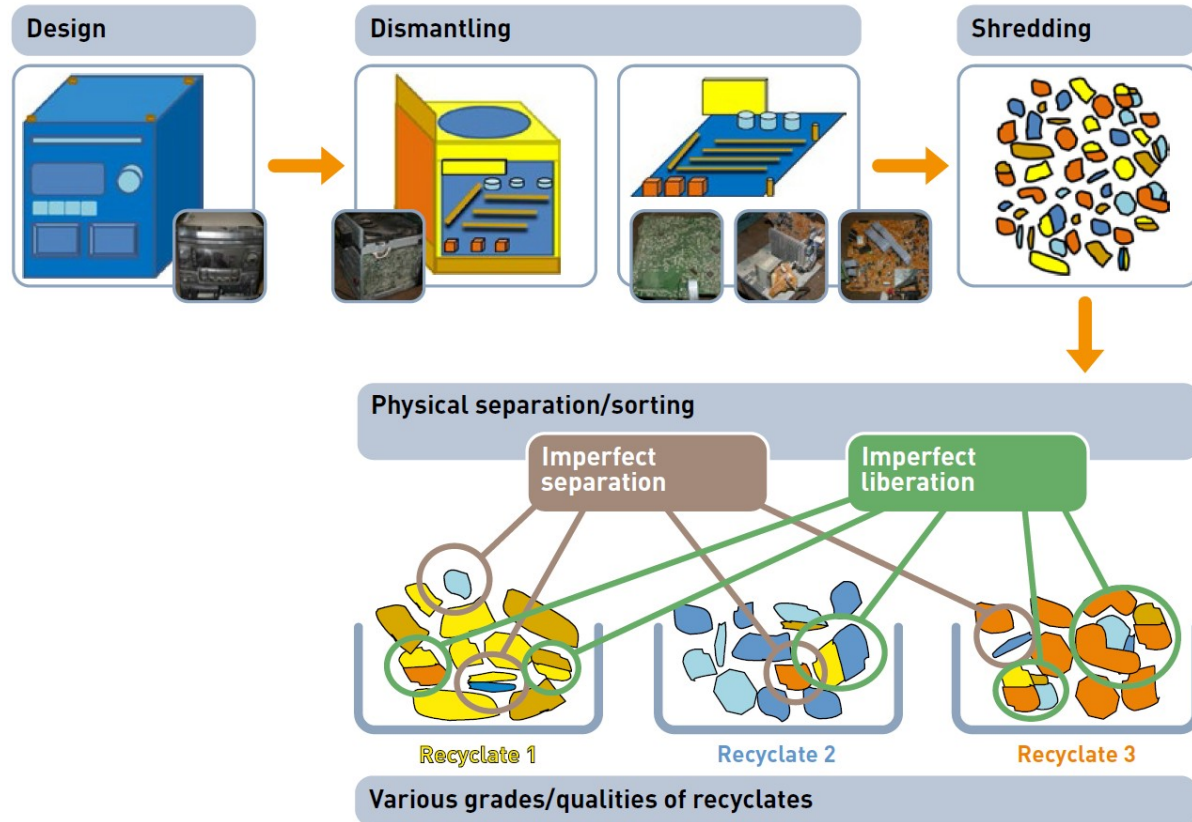
Métal : conversion d'une hétérogénéité de composition naturelle de constitution (minerai) en une hétérogénéité de distribution



**Produits : création d'hétérogénéités de constitution (alliages, assemblages)**  
**Equipements "High tech" sont extrêmement complexes (composition et assemblage)**  
**Très peu sont éco-conçus (au sens d'une facilitation de leur recyclage)**  
**La caractérisation de ces objets en fin de vie reste un challenge**  
**Le recyclage consomme de l'eau, des réactifs chimiques et de l'énergie**



# La libération minéralurgique des particules : un élément clé du recyclage



Reuter, M.A., Van Schaik A. Opportunities and Limits of recycling – A Dynamic-Model-Based Analysis. MRS Bulletin, vol. 37(4), pp. 339 – 347 (special edition on Sustainability) (2012a).

## Une meilleure libération peut-être obtenue :

- par le développement de techniques de fragilisation/broyage/déchetage innovantes ( $\mu$ ondes, puissances électriques pulsées, HPGR)
- En injectant davantage d'énergie dans l'étape de broyage ou, au contraire, en mettant en place des stratégies de « broyage ménagé »

Une meilleure libération minéralurgique permet de maximiser la récupération des fractions d'intérêt lors des étapes de pré-concentration et de faciliter les étapes ultérieures de purification (métallurgie extractive)

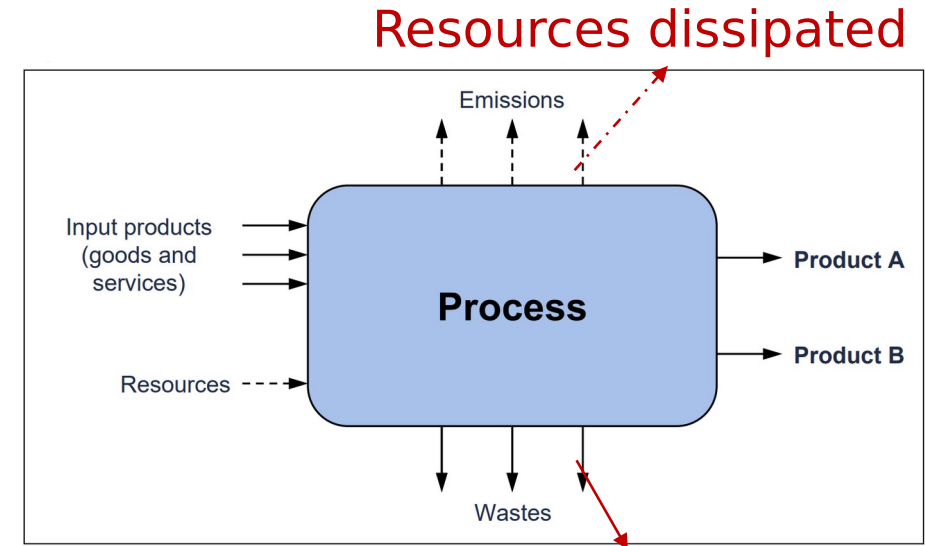
# Recyclage, dissipation (« pertes »), efficacité des ressources

## Concept de « dissipation » dans la pensée Cycle de Vie

- Propriété des métaux : recyclables à l'**infini** !
- Dans l'économie, **les métaux ne « disparaissent » pas**. Ils sont rendus plus ou moins utilisables pour les générations futures
- **Flux dissipatifs** : flux de métaux vers des « stocks finaux » (environnement, dépôt final, recyclage non-fonctionnel), non **accessibles** à de **futurs utilisateurs**
- **L'accessibilité** dépend de facteurs technologiques et économiques, **variables dans le temps**. Elle est **spécifique** à chaque **substance** et au gisement qui la contient

## Nouveaux indicateurs d'efficacité des ressources

- Objectif : aller **plus loin que les consommations de ressources minérales et les taux de recyclage** pour quantifier « **l'efficacité des ressources** » d'un procédé ou d'une économie -> l'enjeu est de connaître à quelle étape de la chaîne de valeur ces ressources sont **rendues plus ou moins (in)utilisables** (perte d'accessibilité, dégradation de la **qualité**). **L'éco-conception** contribue à rendre ces ressources accessibles dans le temps
- Approche de quantification en développement : **bilan entropique** sur les chaînes de procédés/de valeurs (**via l'Analyse du Cycle de Vie et l'analyse des flux de matières**)
- Notion de **qualité** d'une substance en lien avec ses usages futurs

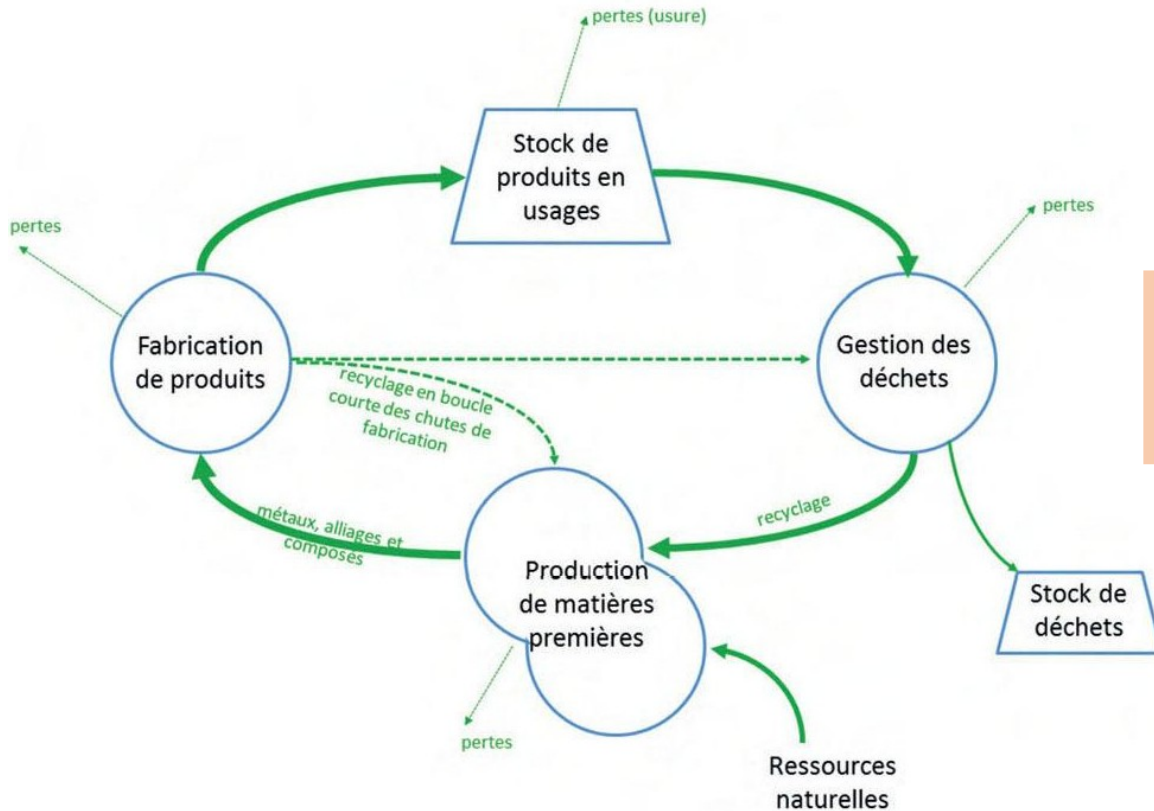
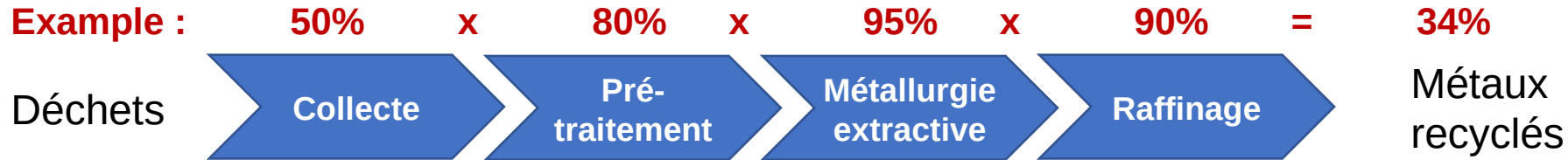


## Resources dissipated

Beylot, A., Ardente, F., Sala, S., Zampori, L. 2020. *Accounting for the dissipation of abiotic resources in LCA: status, key challenges and potential way forward*. Vol. 157. Resour. Conserv. Recycl.

# A garder à l'esprit ...

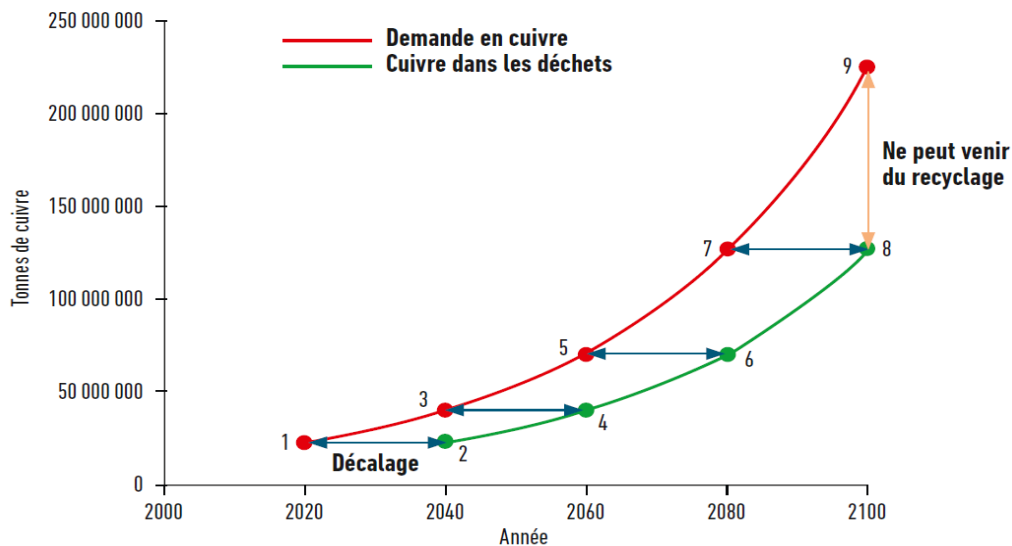
Le recyclage d'objets complexes requiert de la performance sur TOUTE la chaîne, de la collecte jusqu'à la production de substances recyclées. La performance globale est fixée par l'étape la moins efficace



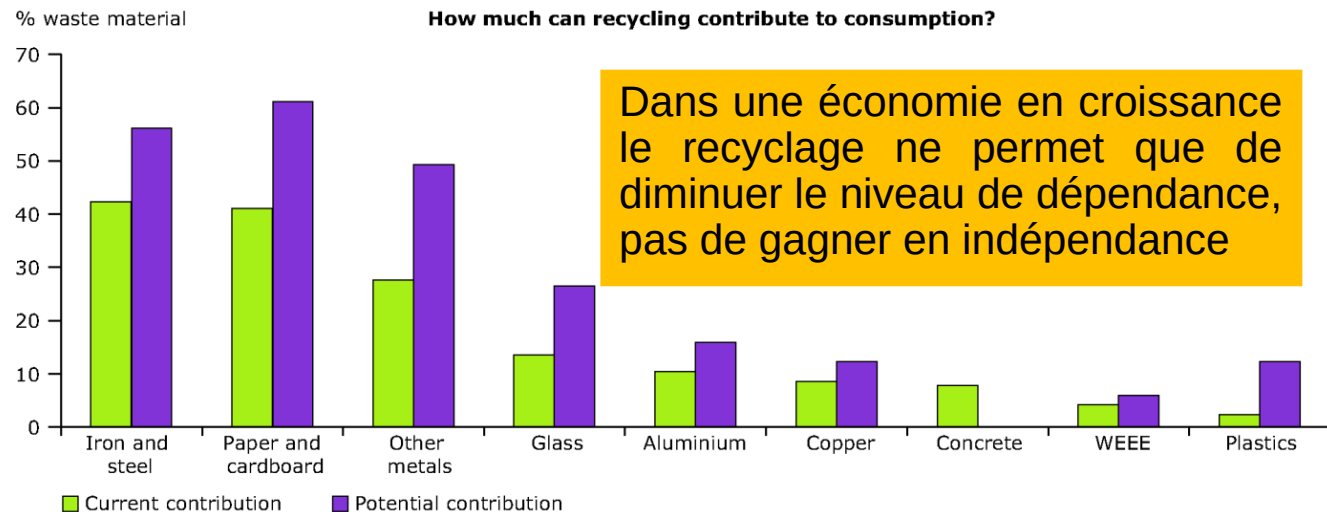
A chaque étape (irréversible) de traitement, on observe des pertes (deuxième principe de la thermodynamique).

# A garder à l'esprit ...

La durée d'utilisation des produits empêchent qu'un recyclage même efficace à 100% puisse répondre aux demandes matières d'une économie en croissance ou même à croissance nulle (du fait des pertes)



Géosciences n°25 (2021)



JRC (2017)

## Exemple des batteries automobiles

- augmentation de production de 15% par an
- Soit un doublement tous les 5 ans
- Soit une production multipliée par 16 en 20 ans
- Si durée de vie d'une batterie ) 20 alors, le recyclage ne permet de répondre qu'à 6% du besoin en année 20

# Halle PLAT'INN – BRGM ORLEANS (minéralurgie et métallurgie extractive)

## HALLE PILOTE BRGM



Traitement de la matière :  
**200**

*Équipements de traitement du gramme à la tonne*



## EQUIPEMENTS DE TRAITEMENT DES MATIÈRES MINÉRALES

- Concassage / Broyage / classification
- Préparation de la matière et échantillonnage
- Séparation magnétique / Séparation gravimétrique
- Flottation
- Séparation solide-liquide
- Métallurgie extractive (pyro / hydro)

## OUTILS

- Modélisation mécanistiques et systémiques des procédés
- Outils de simulation numérique (« maison », COMSOL, HSC, USIMPAC)
- Évaluation environnementale – ACV (SIMAPRO)

## MOYENS HUMAINS & COMPETENCES

- 25 ingénieurs/chercheurs/techniciens
- Échantillonnage, caractérisation
- Génie des Procédés, Génie Chimique, Biotechnologies
- Analyse environnementale



# Traitement des matières minérales : filières industrielles d'intervention du BRGM



**Filière Mine**  
(Ressources primaires et déchets miniers)

**Filière Mine Urbaine & Recyclage**  
Déchets Post-consommations

**Filière BTP**  
(des granulats aux déchets du BTP)

**Filière Sédiment**

**Filière Friches & sols pollués**  
Réhabilitation, refunctionalisation des sols

**Echantillonnage & Analyse & caractérisation & Traçabilité**

**Développement de procédés**

**Simulation/modélisation & Evaluation des filières, des procédés et des impacts (ACV)**

**Analyse Globale : inventaire, cartographie des flux et stocks de matières**

# Conception et développement de solutions de traitements innovantes (exemples)

## Exemple 1



La fragmentation électrodynamique :

Une solution au recyclage des bétons fibrés à ultra-hautes performances  
Et un traitement optimisé des minerais

## Exemple 2



La Biolixiviation :

Développement d'un nouveau type de bioréacteurs  
Une solution au recyclage des DEEE

## Orientations de recherche :

- Méthodes innovantes pour l'échantillonnage et la caractérisation de matrices complexes et émergentes
- Procédés flexibles et en rupture permettant de valoriser (métaux/matériaux) des matrices complexes (DEEE, Batteries, ...) ou des effluents industriels (traitement surface)
- Préparation de MPR permettant la préparation « d'alliage » issus du recyclage (ex : aimants TR)
- Approfondir la compréhension des processus physiques, chimiques et biologiques pour améliorer l'efficacité des procédés, les modéliser/simuler afin d'améliorer la compréhension des phénomènes qui les gouvernent et assurer le transfert à l'échelle industrielle
- Couplage des analyses de performances techniques, économiques et environnementales des procédés pour évaluer leur viabilité

# Conclusions

- Le recyclage seul ne permettra pas de satisfaire les demandes en substances minérales de nos économie (c'est un leurre) en particulier pour celles dont les taux de croissance double tous les 5 ans ...
- La collecte des équipements en fin de vie, les performances des procédés de recyclage, la complexité des objets, l'évolution rapide de la composition des gisements de déchets sont autant de barrières au développement d'une activité de recyclage performante
- De nouvelles stratégies sont à développer à l'échelle européenne. Elles doivent intégrer l'approvisionnement responsable (I et II), l'éco-conception de équipements, l'écologie territoriale, la consommation responsable, l'augmentation de la durée de vie des équipements, le recyclage ...
- Nous devons diversifier nos sources d'approvisionnement (mine, résidus miniers, mines urbaines) pour maximiser la récupération des substances minérales et les rendre ainsi plus « efficaces »
- Le recyclage requiert de développer de nouveaux procédés, plus propres, plus efficaces, davantage flexibles pour accepter des flux de matière de composition variable dans le temps
- Il faut produire des métaux recyclés en France et pas seulement des fractions métalliques non purifiées destinées à l'exportation. Nos chaînes de collecte (partiellement financées par de l'argent public) sont très performantes, il serait opportun que nous en profitions
- Enfin, il nous faut relocaliser les chaînes de production d'équipements en identifiant celles qui créent de la valeur

CONTACT

BRGM

Equipe Déchets et Matières Premières (DEPA/DMP)

Yannick Ménard [y.menard@brgm.fr](mailto:y.menard@brgm.fr)