



# Recyclage des matières du numérique

## *Réalités, freins et solutions*

**Jean-François GERARD**

Ingénierie des Matériaux Polymères UMR CNRS 5223

[jean-francois.gerard@insa-lyon.fr](mailto:jean-francois.gerard@insa-lyon.fr)



**GreenDays'26**  
Sophia-Antipolis. Mars 10-11, 2026



**INSA** INSTITUT NATIONAL  
DES SCIENCES  
APPLIQUÉES  
LYON



# Sommaire

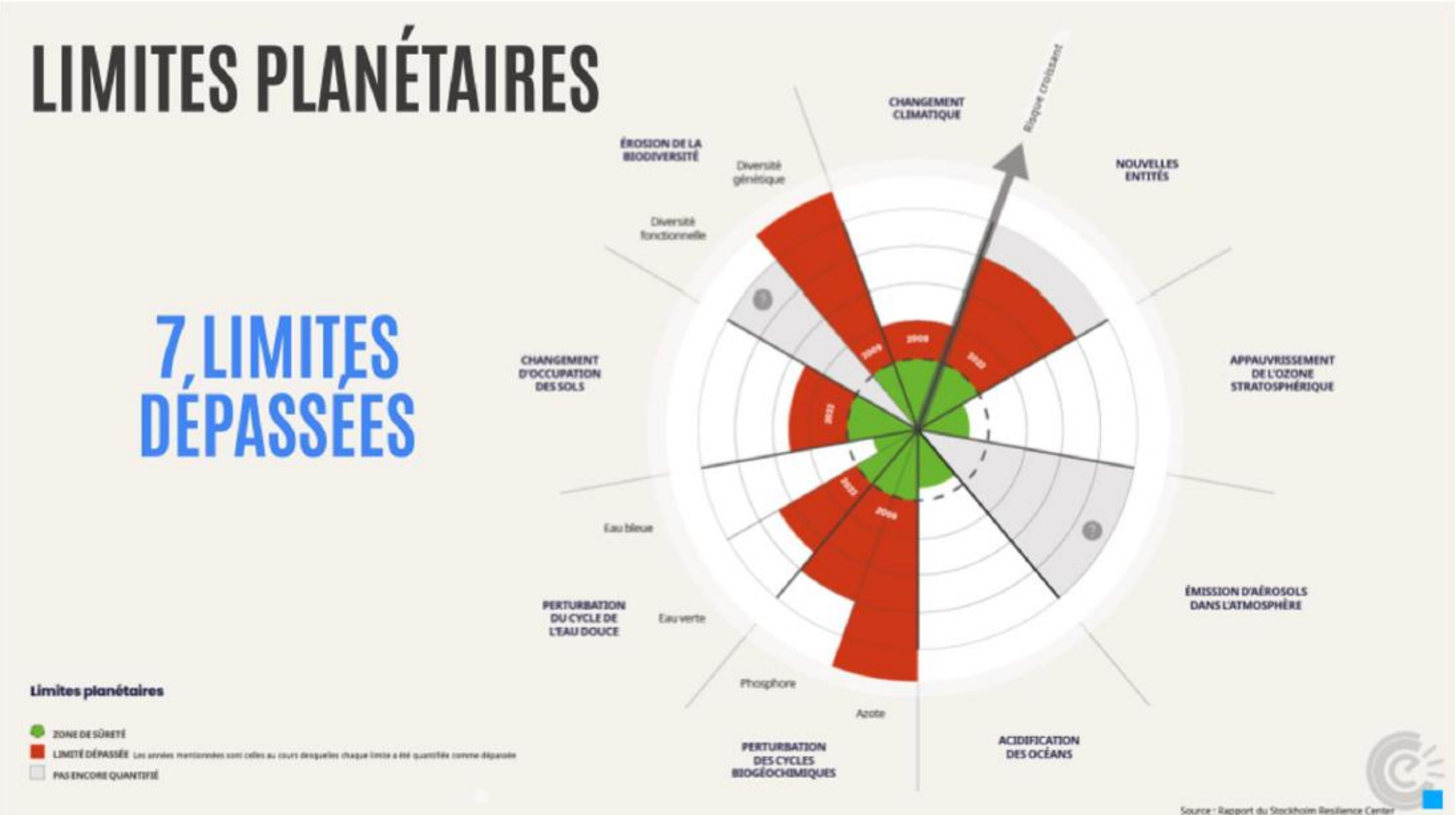
**1.- INTRODUCTION GENERALE – CONTEXTE GENERAL  
ENJEUX DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE (DES MATIERES)**

2.- MATERIAUX DU NUMERIQUE ET LEUR RECYCLAGE

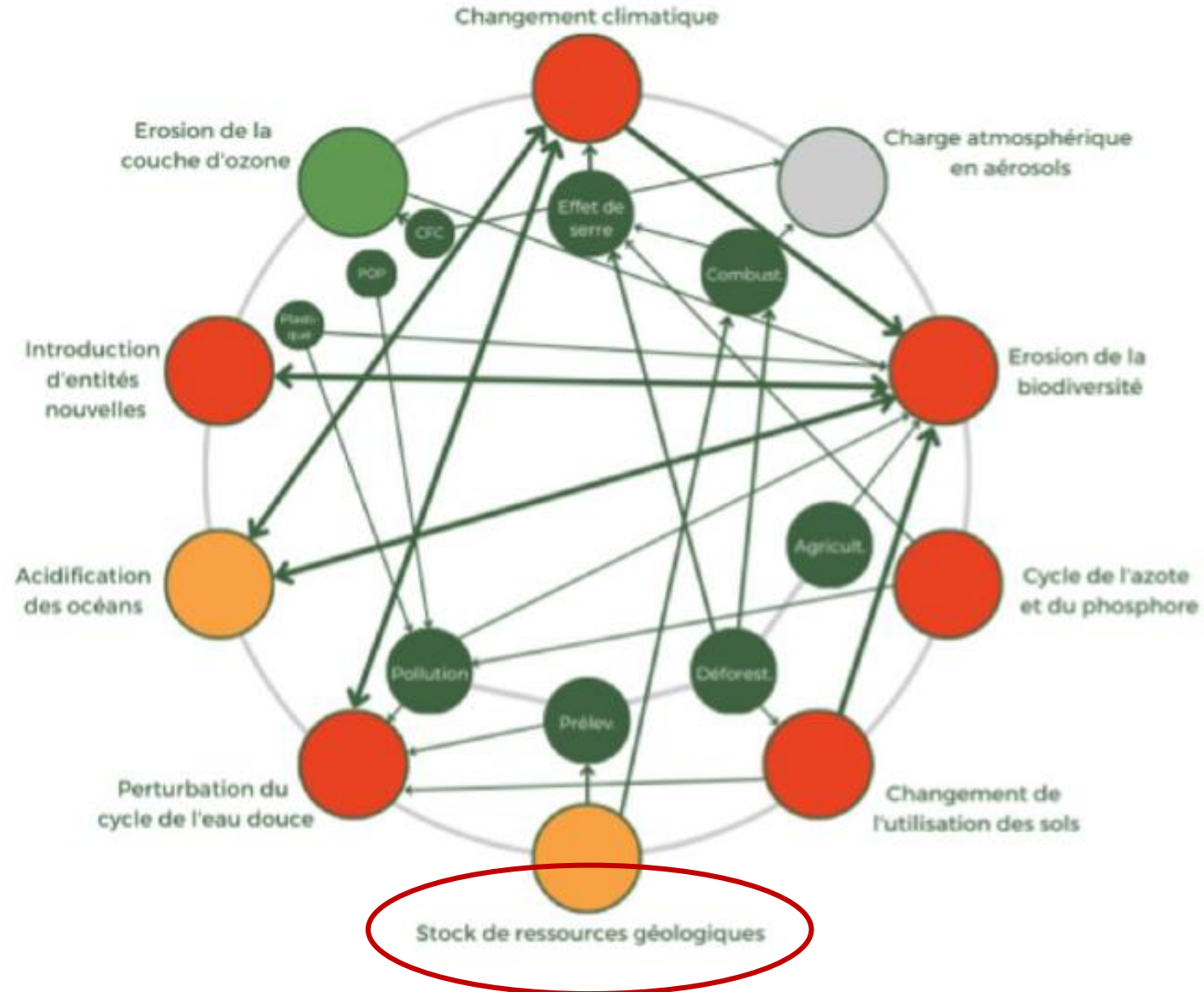
3.- ECONOMIE CIRCULAIRE DES MATIERES  
REQUIS ET FREINS A LA CIRCULARITE

4.- AUTRES MODELES ECONOMIQUES DE CIRCULARITE

# L'enjeu des limites planétaires



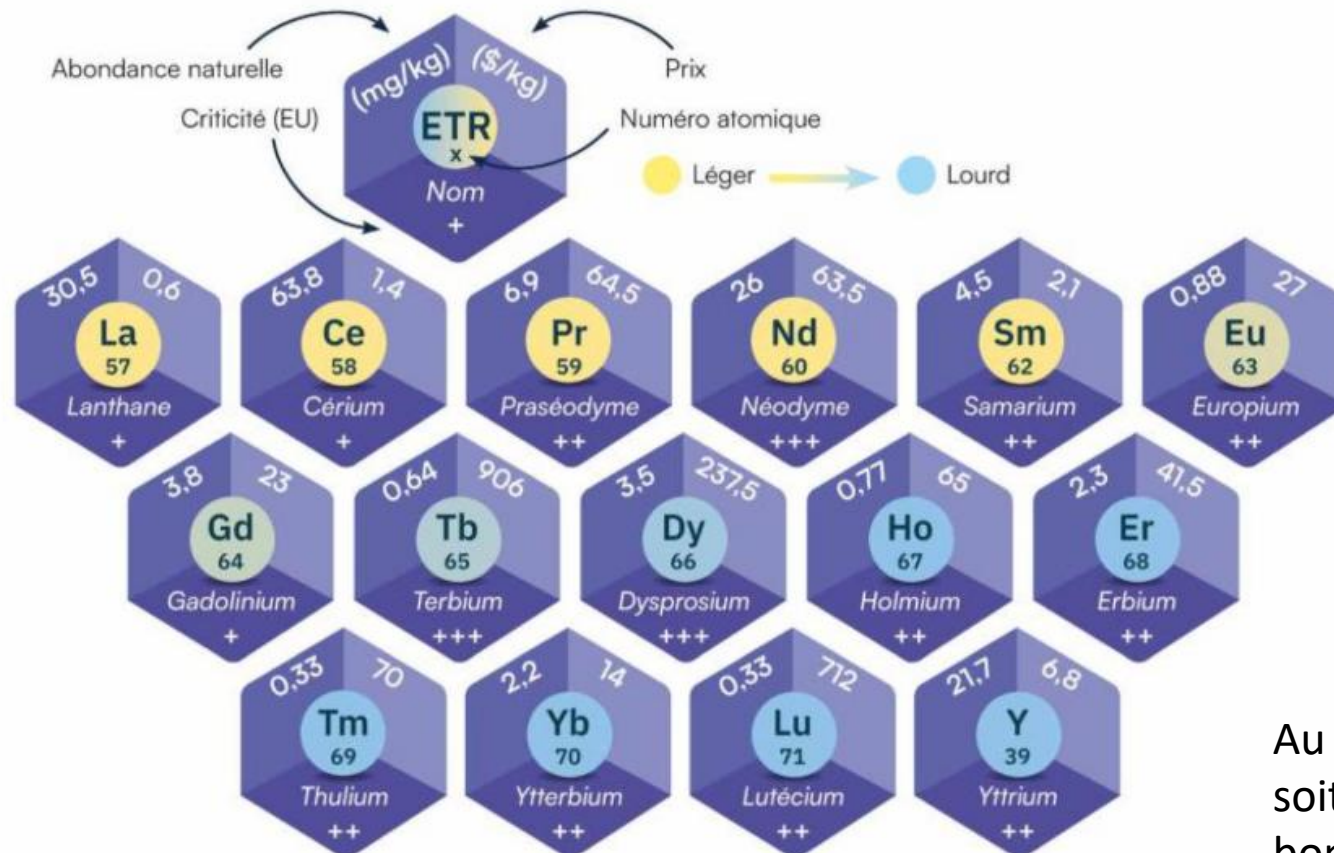
# Notamment de la finitude des ressources



# Notamment de la finitude des ressources

**Mais attention aux idées reçues ...**

**Exemple 1/ Les terres 'rares' ne sont pas aussi rares que d'autres éléments**

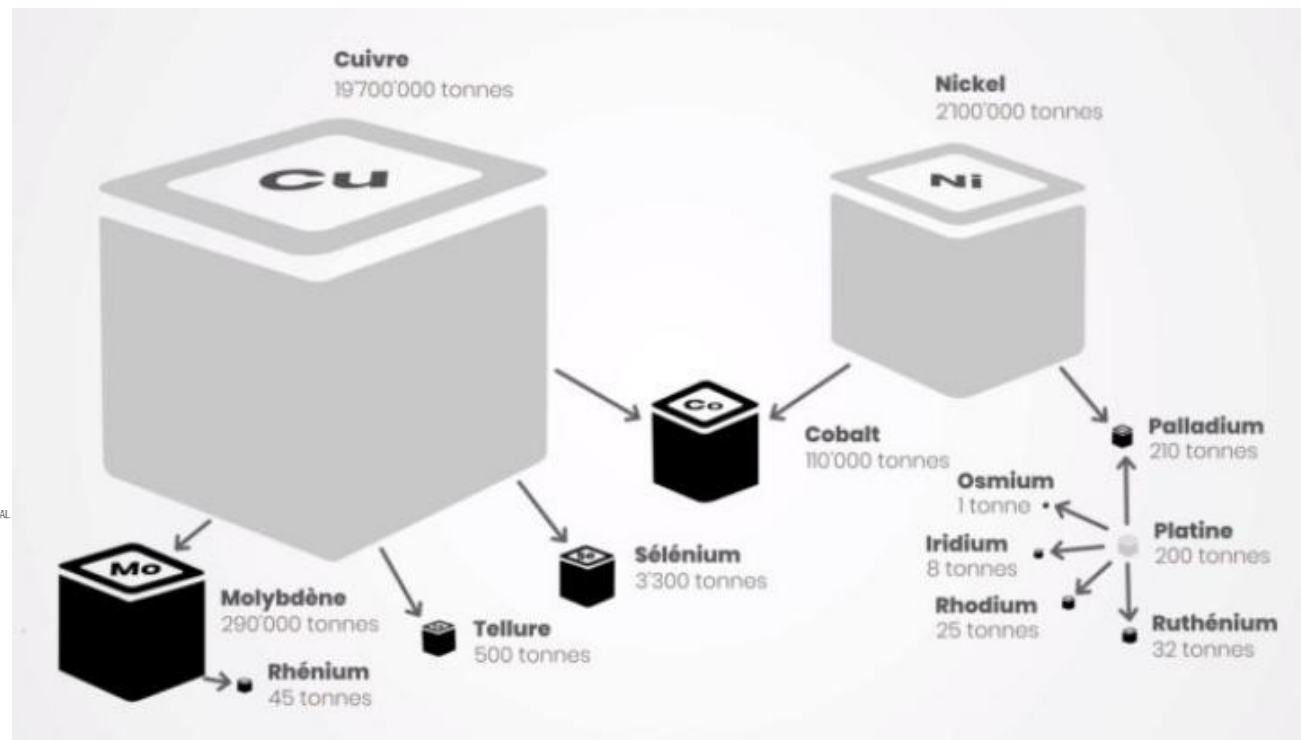


Au : 5 µg/kg  
soit près de 13 000 fois moins a  
bondant que Ce et 5 000 que Nd

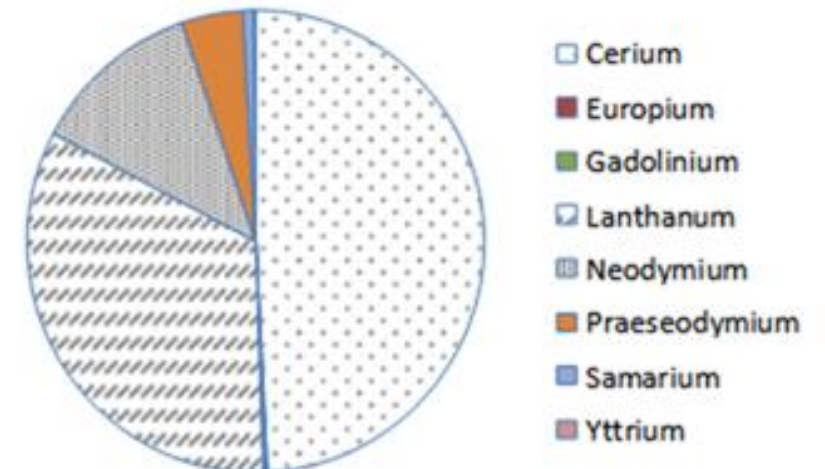
# Notamment de la finitude des ressources

**Mais attention aux idées reçues ...**

**Exemple 1/ Les terres 'rares' ne sont pas extraites individuellement et souvent simultanément avec métaux conventionnels**



Composition mine de Mountain Pass (USA)



N. Haque et al., Resources 2014, 3, 614-635;  
doi:10.3390/resources3040614

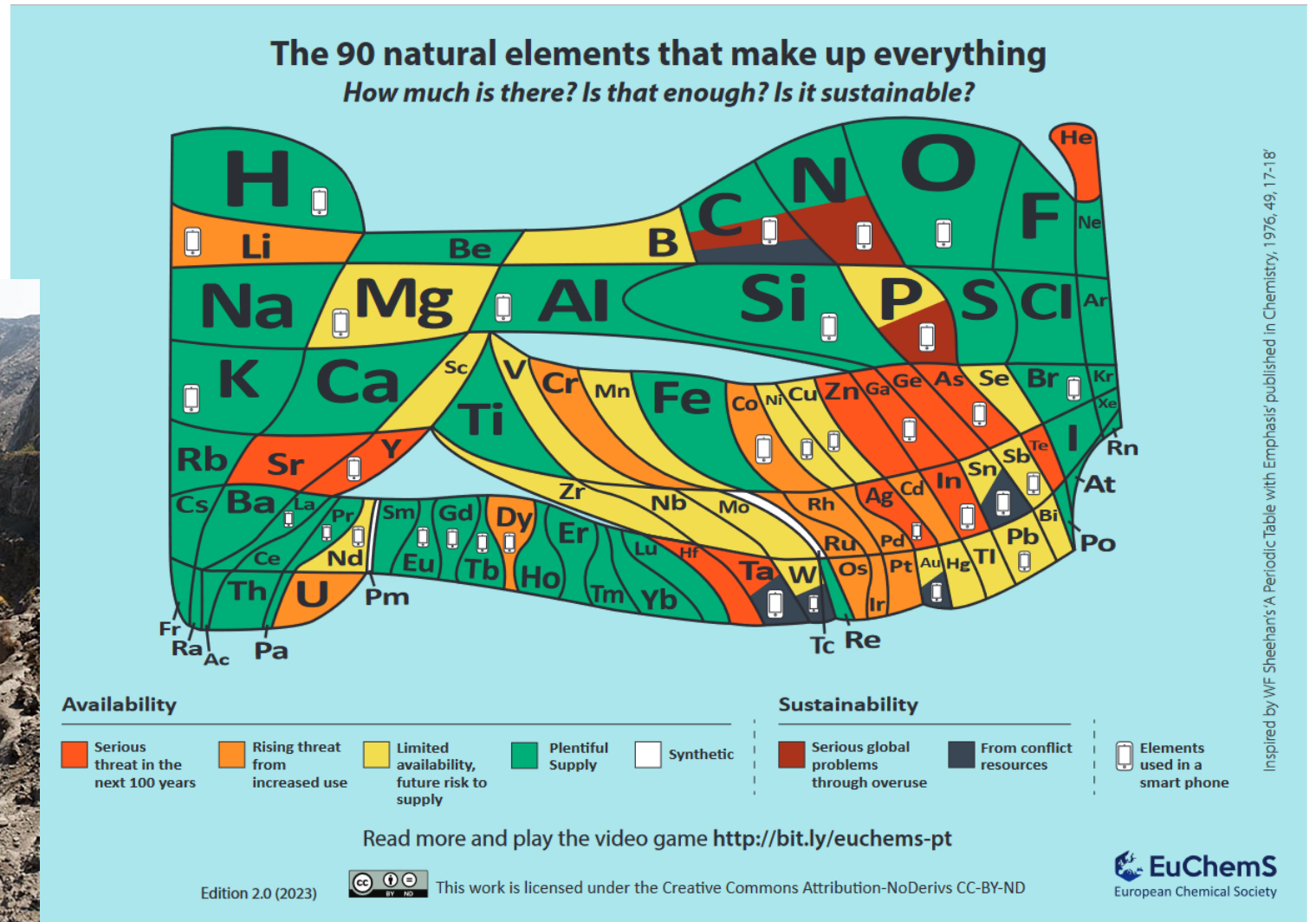
# Notamment de la finitude des ressources

*Mais attention aux idées reçues ... Exemple des métaux 'traditionnels'*

Des ressources en métaux/terres rares limitées sur Terre (limites planétaires)

...

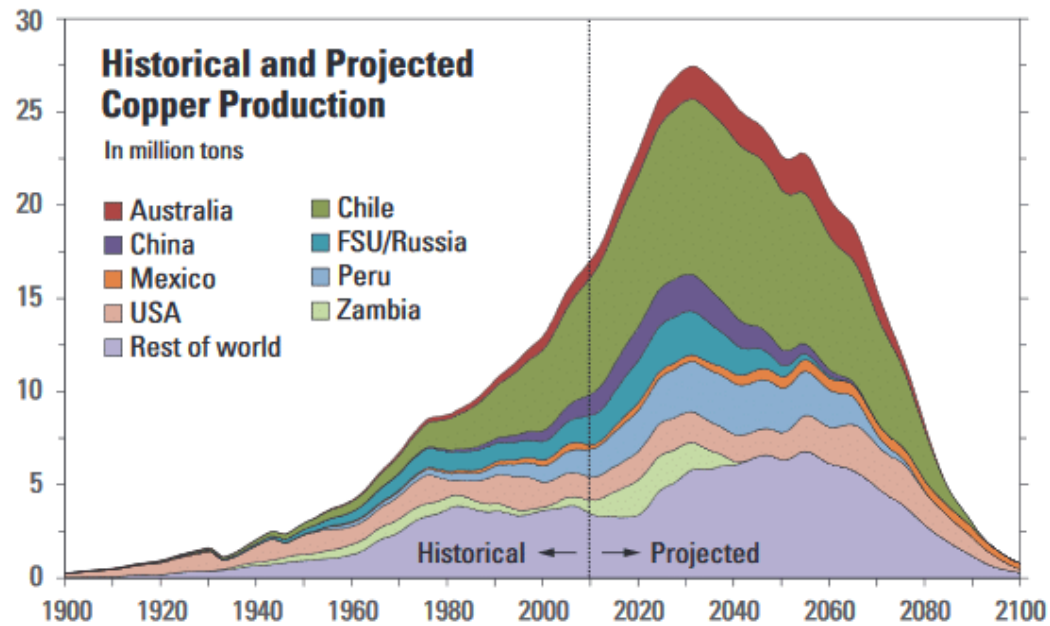
Crédits : Dillon Marsh



# Notamment de la finitude des ressources

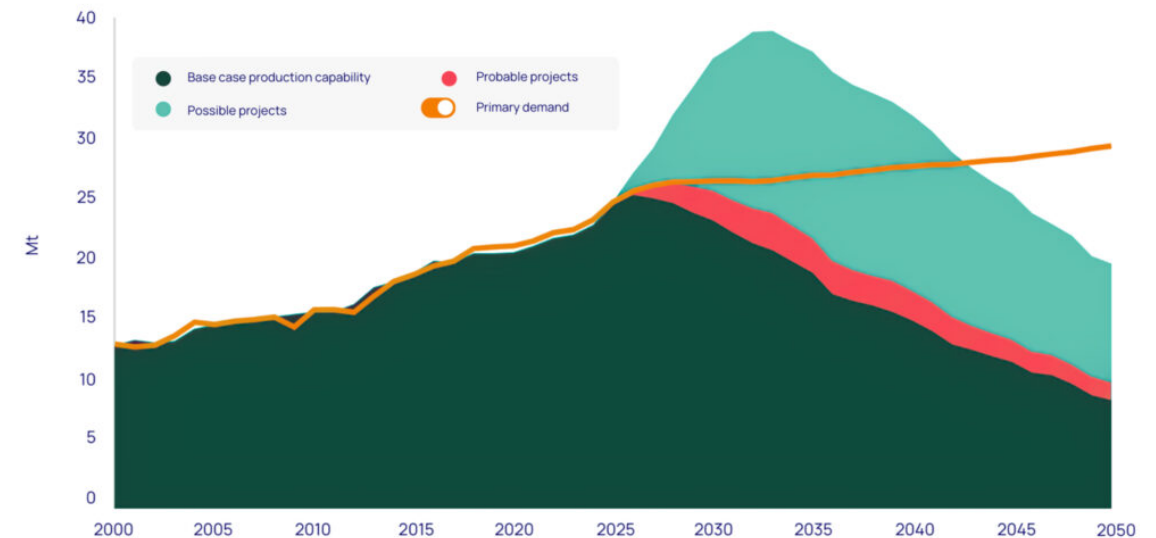
*Mais attention aux idées reçues ...*

*Exemple 2/ L'électrification de la société et la demande de cuivre*



Source: Kerr, R. (2014); The coming copper peak. Science 343, 722-724.

## Global copper production and primary demand



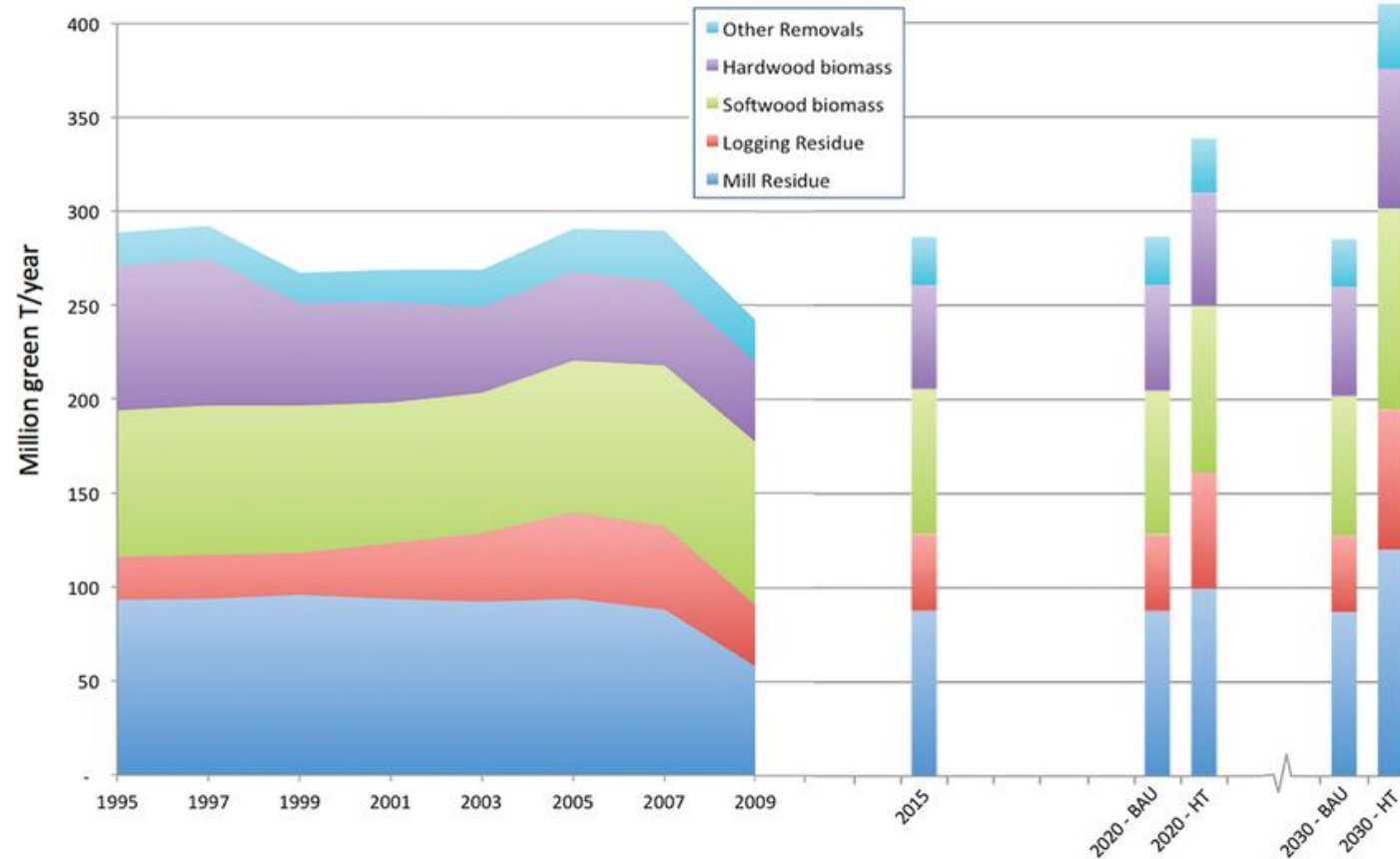
Source: Wood Mackenzie, The future of the copper market

Source: Wood McKenzie. The copper market (2020)

# Notamment de la finitude des ressources

***Mais attention aux idées reçues ...***

***Exemple 3/ La biomasse, source de toutes les solutions ... mais elle est limitée elle aussi***



# La prise en compte des réalités du Monde

## Les principes d'une économie intégrée

### LA THÉORIE DU DONUT

#### L'ÉCONOMIE DE DEMAIN EN 7 PRINCIPES

Kate Raworth

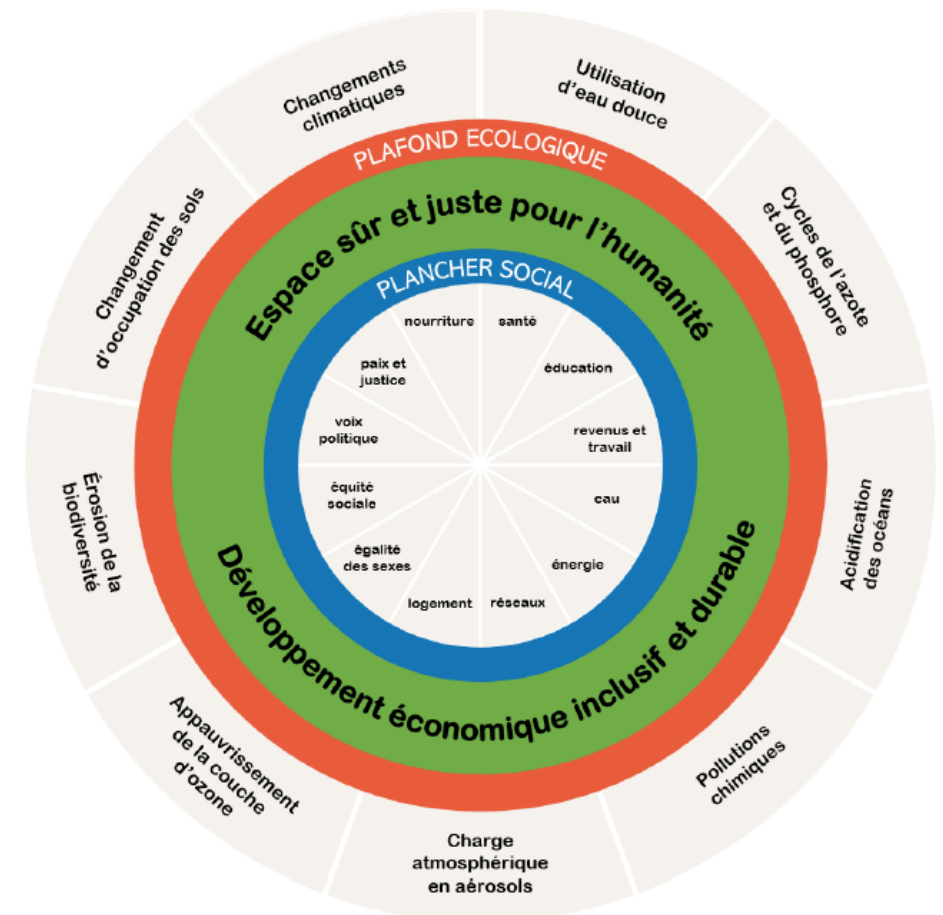
La théorie du Donut présente une vision optimiste de l'avenir commun de l'humanité : une économie planétaire qui crée un équilibre prospère grâce à son design distributif et régénératif.

Elle s'appuie sur 7 manières de penser l'économie :

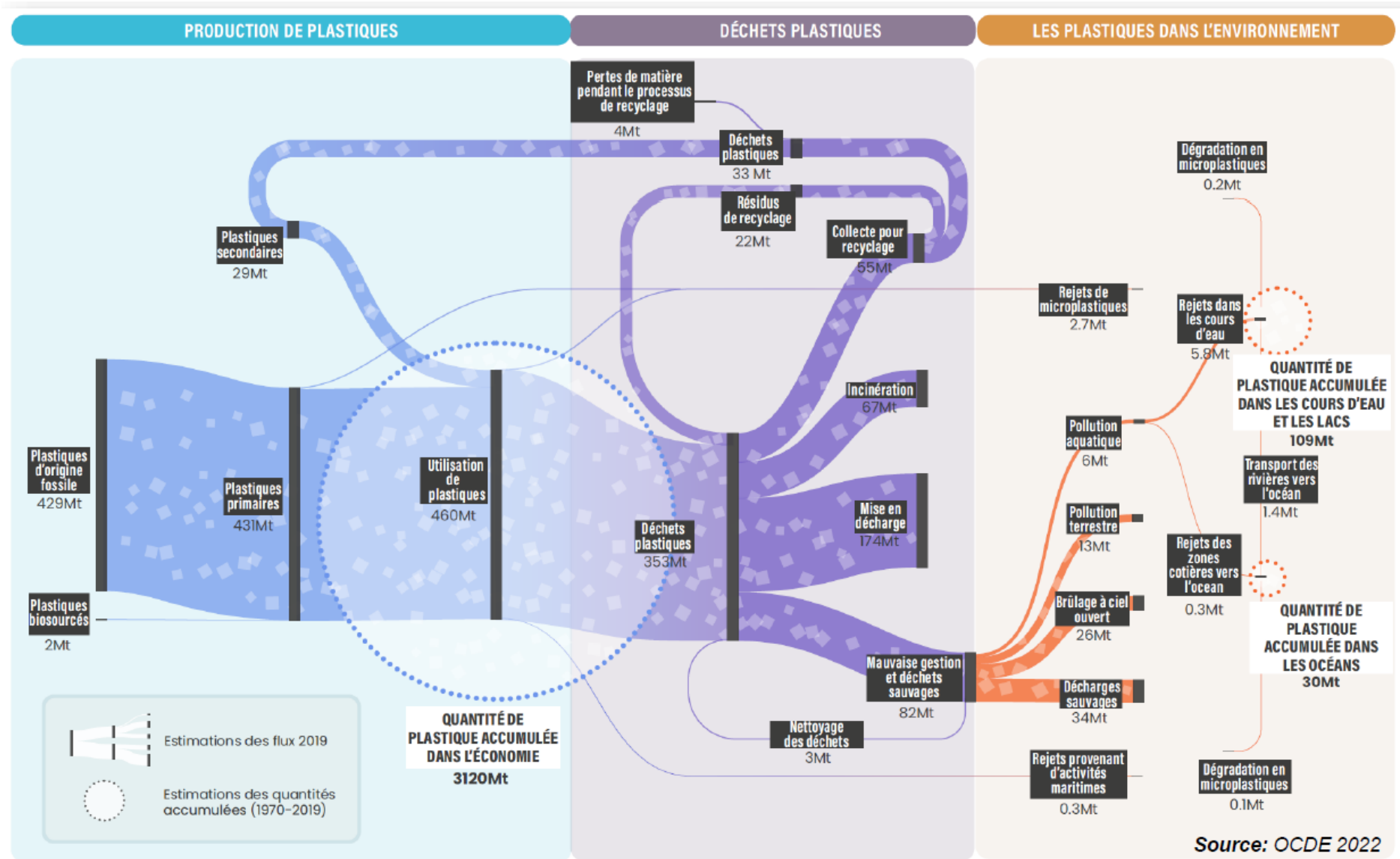
1. Changer de but : le "Donut" remplace la croissance du PIB
2. Intégrer l'économie au sein de la société et de la nature
3. Cultiver la nature humaine : de l'homme économique rationnel aux humains sociaux adaptables
4. Mieux connaître les systèmes pour prendre en compte la complexité dynamique
5. Redessiner pour redistribuer : être distributif par design
6. Créer pour régénérer : arrêter la conception industrielle dégénérative pour être régénératif par design
7. Être agnostique en matière de croissance : non plus accro à la croissance mais agnostique.

L'essence du Donut : un fondement social de bien-être en deçà duquel personne ne devrait tomber et un plafond écologique de pression planétaire au delà duquel nous ne devrions pas aller;

Entre les deux se situe un espace juste et sûr pour nous



# Qu'en-est-il des différentes matières? Les plastiques



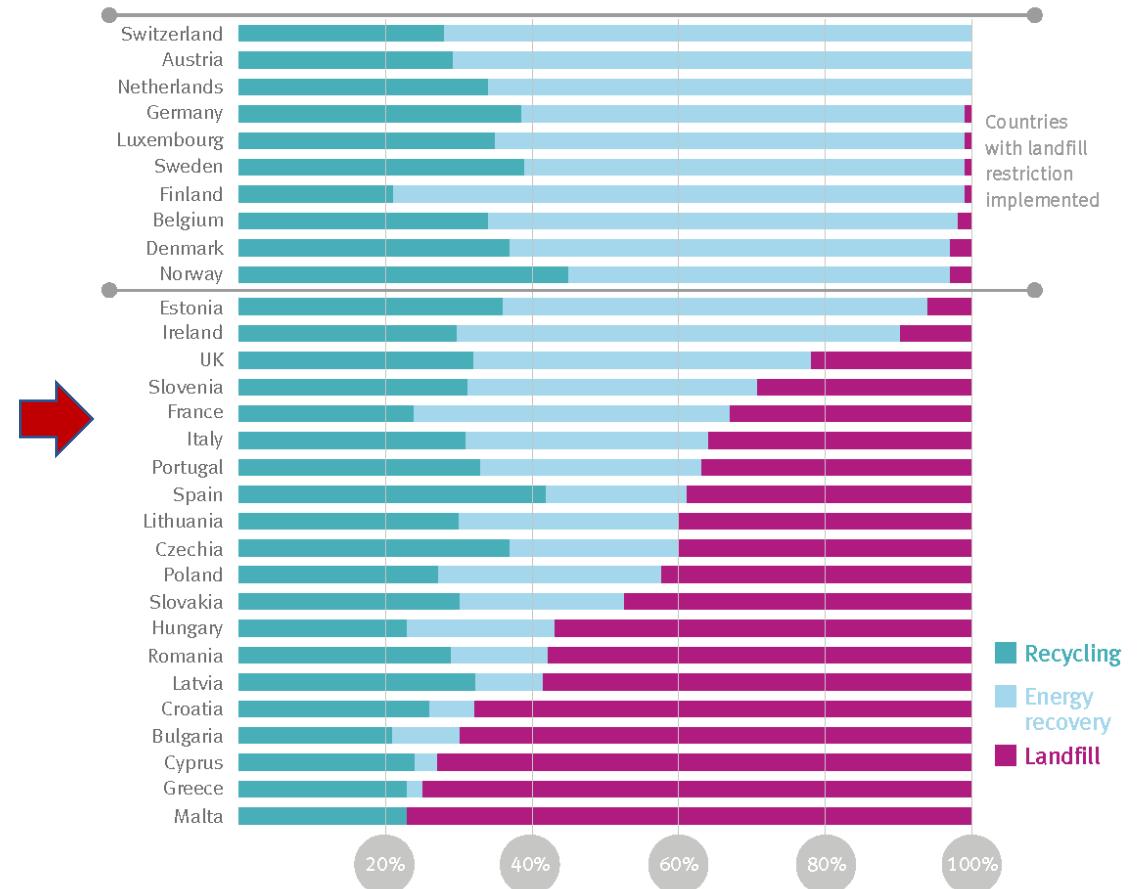
# Qu'en-est-il des différentes matières? Les plastiques



SOURCE: Conversio Market & Strategy GmbH

## Le recyclage des plastiques

Plastic post-consumer waste rates of recycling, energy recovery and landfill per country in 2018

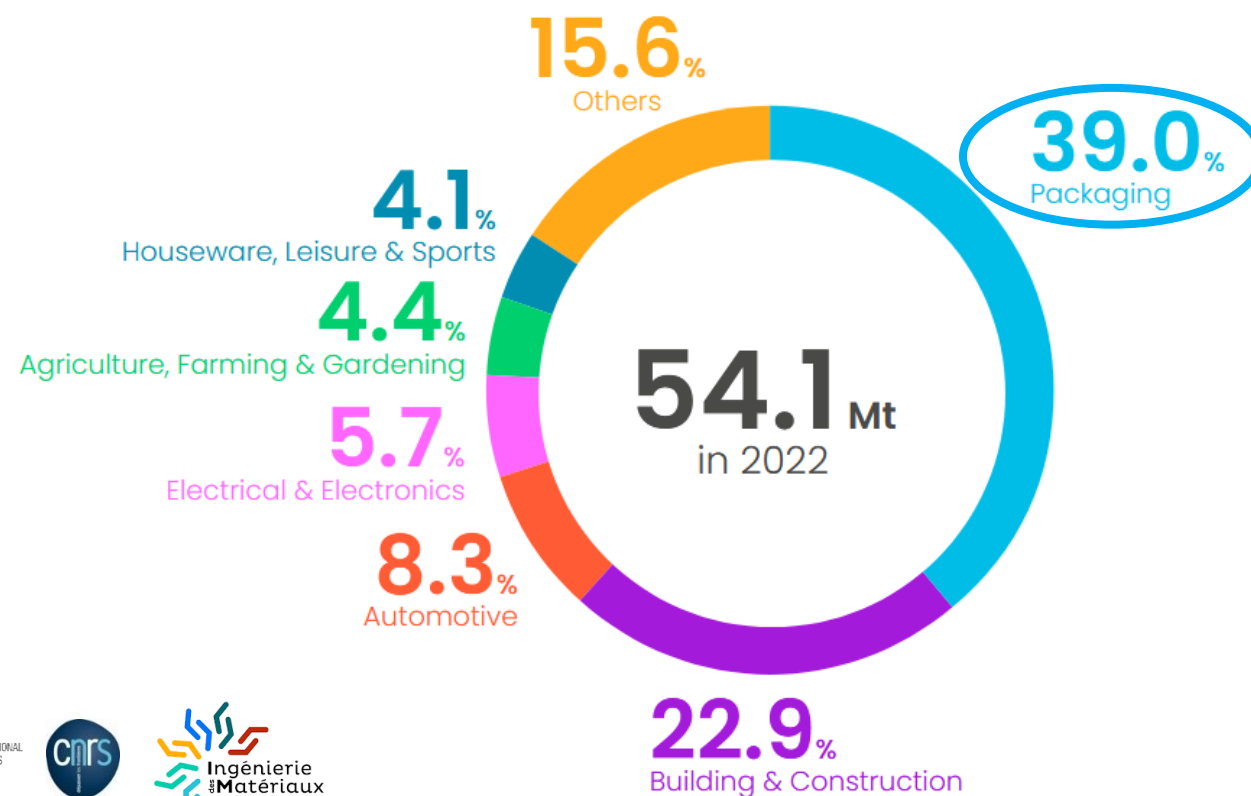
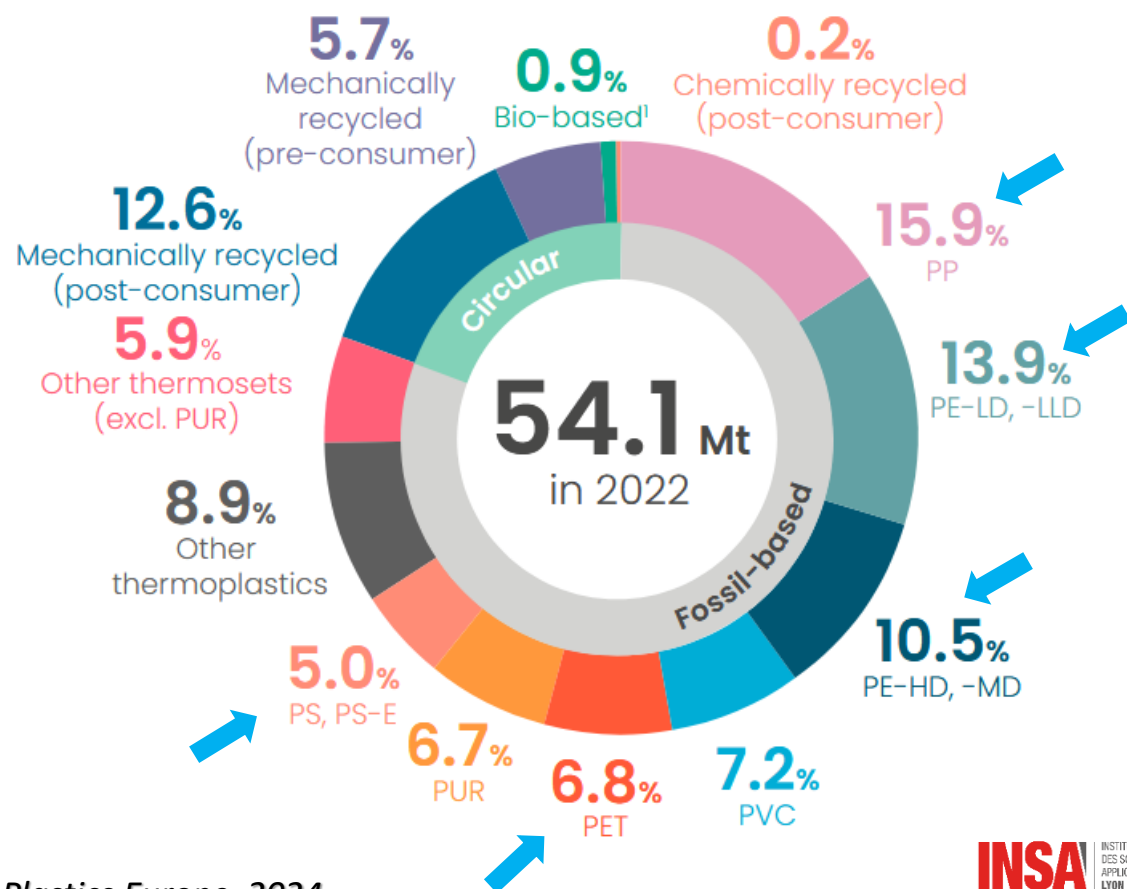


Pour les emballages en 2023 (EU):  
 35 kg générés / habitant  
 15 kg recyclés / habitant

# Qu'en-est-il des différentes matières? Les plastiques

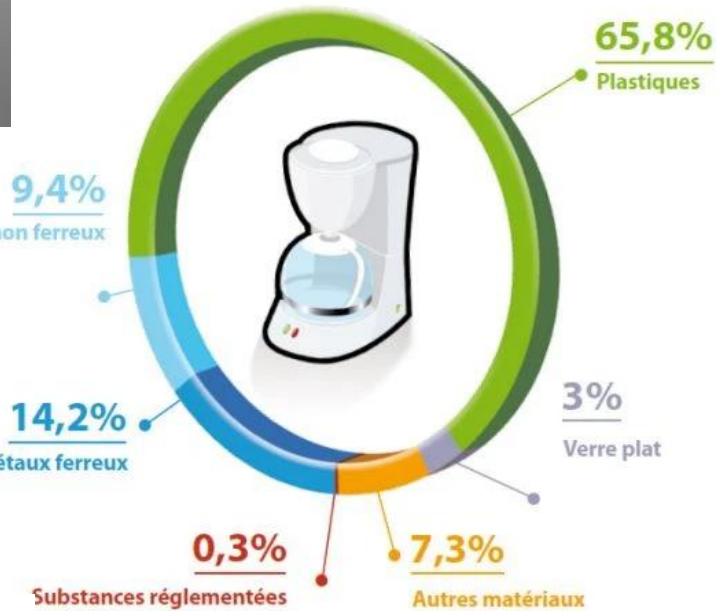
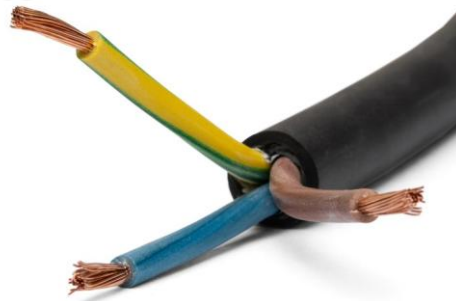
Quelques grands polymères constituent la majorité des polymères produits

... et se retrouvent utilisés pour le packaging, l'usage majoritaire



# Qu'en-est-il des différentes matières? Les plastiques

*Les matières plastiques sont intégrées/assemblées dans des produits/dispositifs/objets*

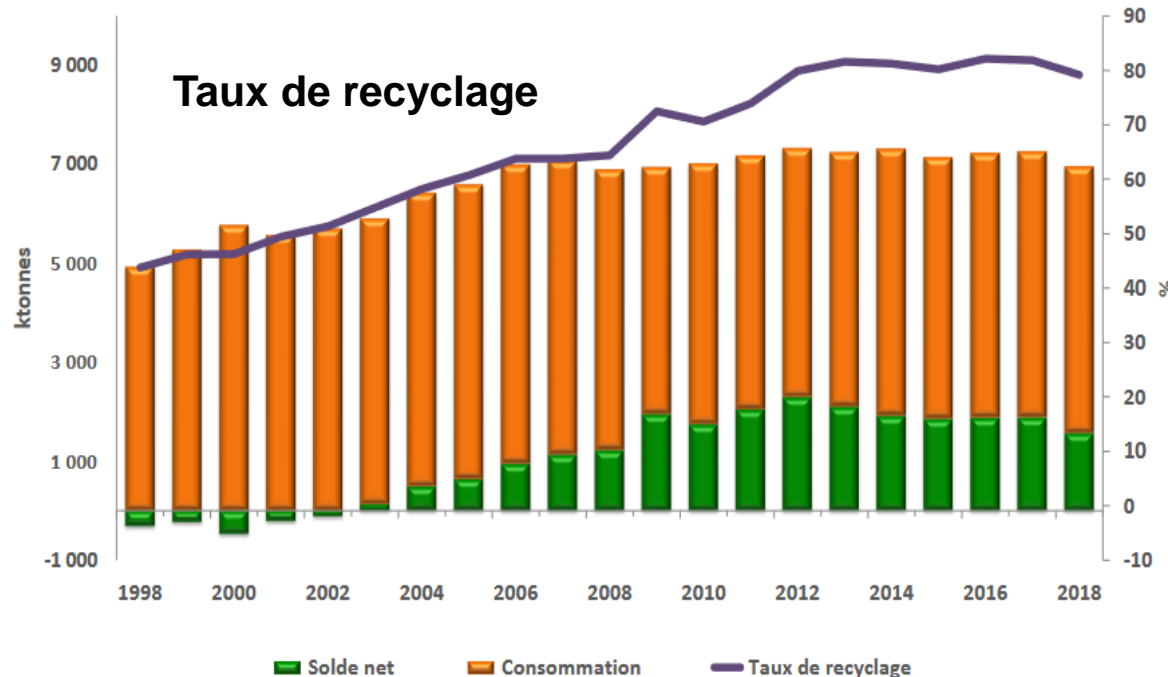


# Qu'en-est-il des différentes matières? Les papiers/cartons



Le recyclage en chiffres:

62% de consommation de fibres via fibres issues recyclage (92% dans packaging, 71% dans journaux, 38% dans papier toilette)



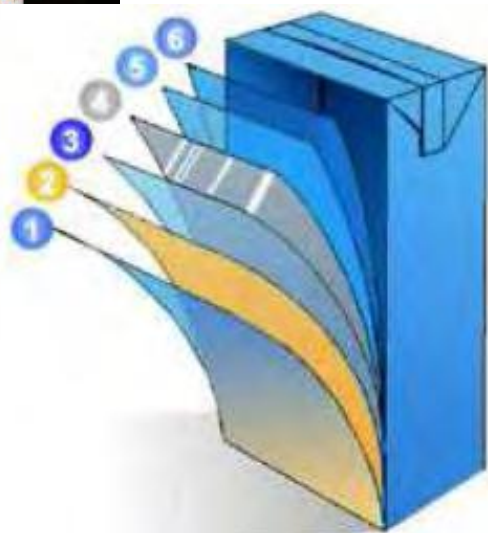
*L'industrie papetière aux fortes spécificités:*

- Forts investissements et coûts d'exploitation industriels (OPEX et CAPEX)
- Faible retour financier
- Fort impact environnemental et énergétique
- Matériaux de recyclage réintégrés dans produits de faible valeur ajoutée (downcycling)

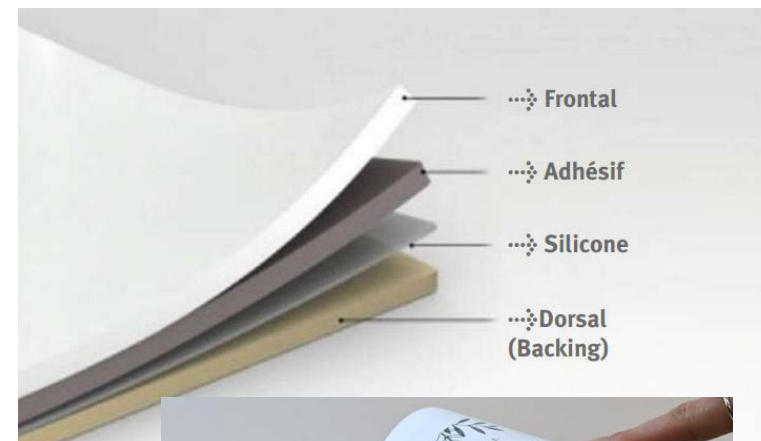
Consumption, net balance, and recycling rate (1998 - 2018)  
for papers and cardboards [Copacel, 2019]

# Qu'en-est-il des différentes matières? Les papiers/cartons

*Souvent assemblés avec d'autres matériaux*



- 1 - Polyethylene;
- 2 - Paper;
- 3 - Polyethylene;
- 4 - Aluminum sheet;
- 5 - Polyethylene;
- 6 - Polyethylene.

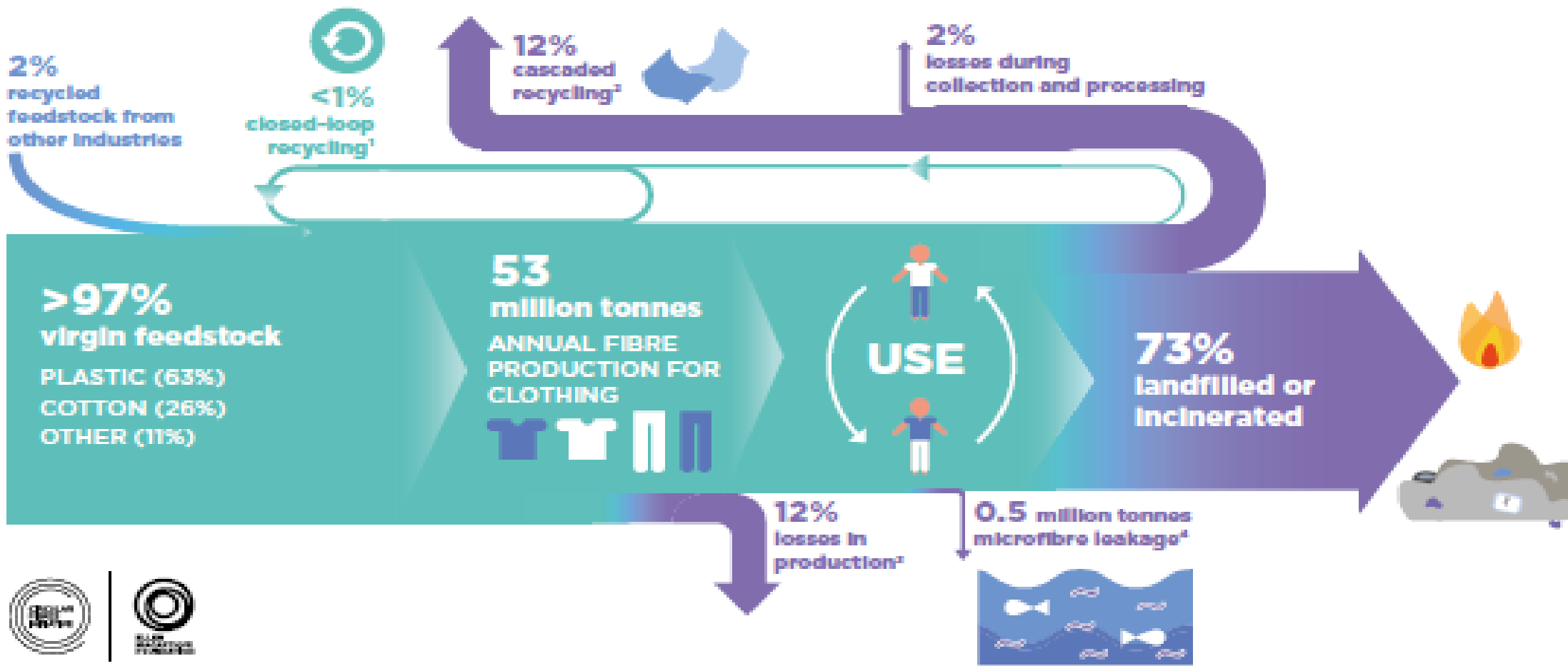


100 milliards d'objets textiles produits / an

11,3 kg / an jetés par chaque habitant EU soit 5,8 Mt/an en Europe

# Qu'en-est-il des différentes matières?

## Les textiles (en particulier de l'habillement)



**INSA** INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUÉES LYON



Ingénierie  
Matériaux  
Polymères

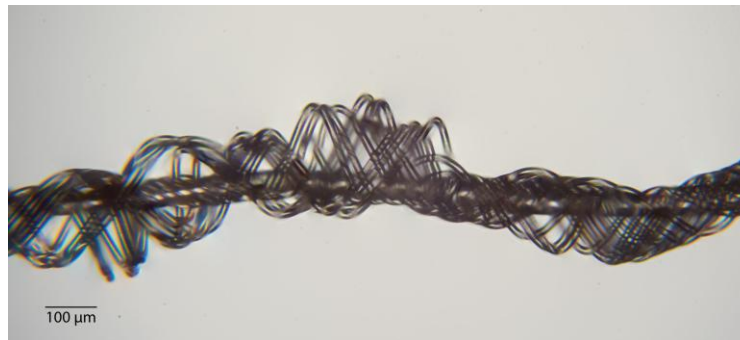
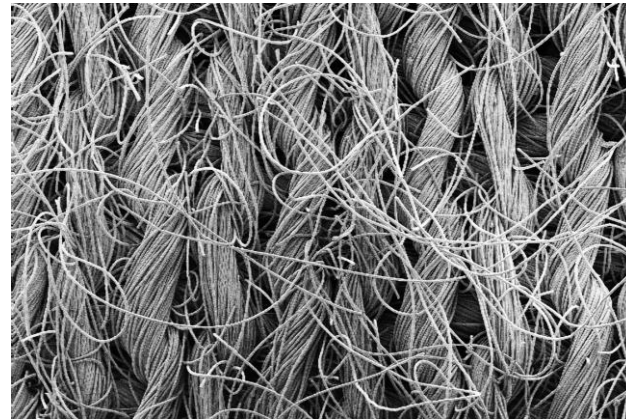
- 1 Recycling of clothing into the same or similar quality applications
- 2 Recycling of clothing into other, lower-value applications such as insulation material, wiping cloths, or mattress stuffing
- 3 Includes factory offcuts and overstock liquidation
- 4 Plastic microfibres shed through the washing of all textiles released into the ocean

# Qu'en-est-il des différentes matières? Les textiles (en particulier de l'habillement)

***Là encore des multimatériaux et des associations avec des 'objets'***

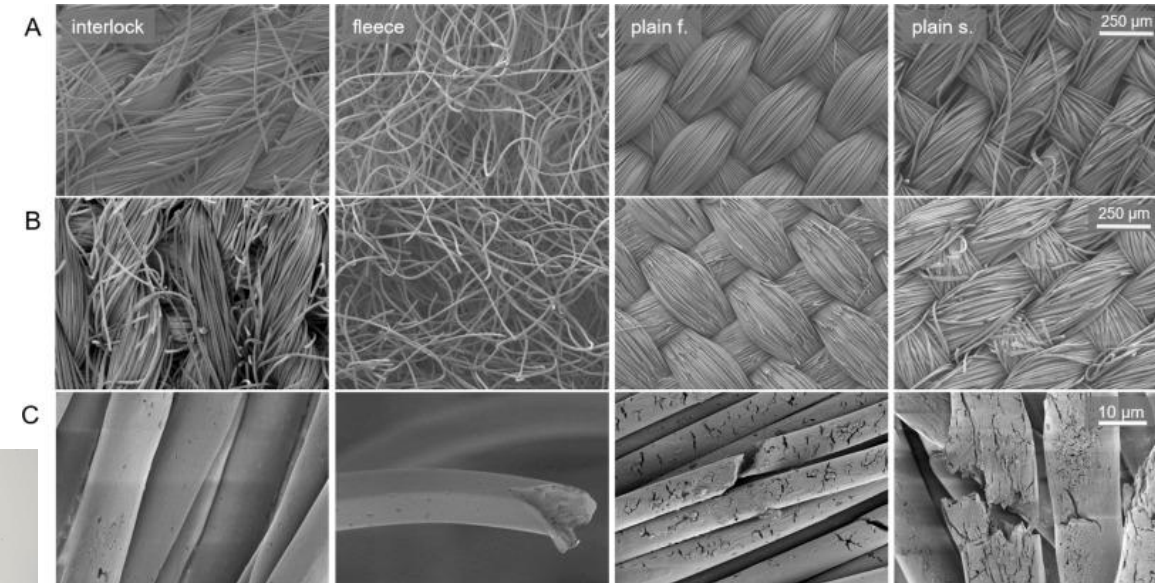


Photo: Y. Cai et al, J. Cleaner Prod., (2020)



Elastane mono-filament covered with polyamide 66 in an elastic yarn (Univ. Innsbruck).

*Textile polyamide / polyester*



B. Pinlova et al., Environm. Pollution (2023)

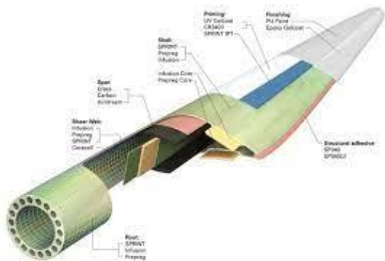


Textileaddict®

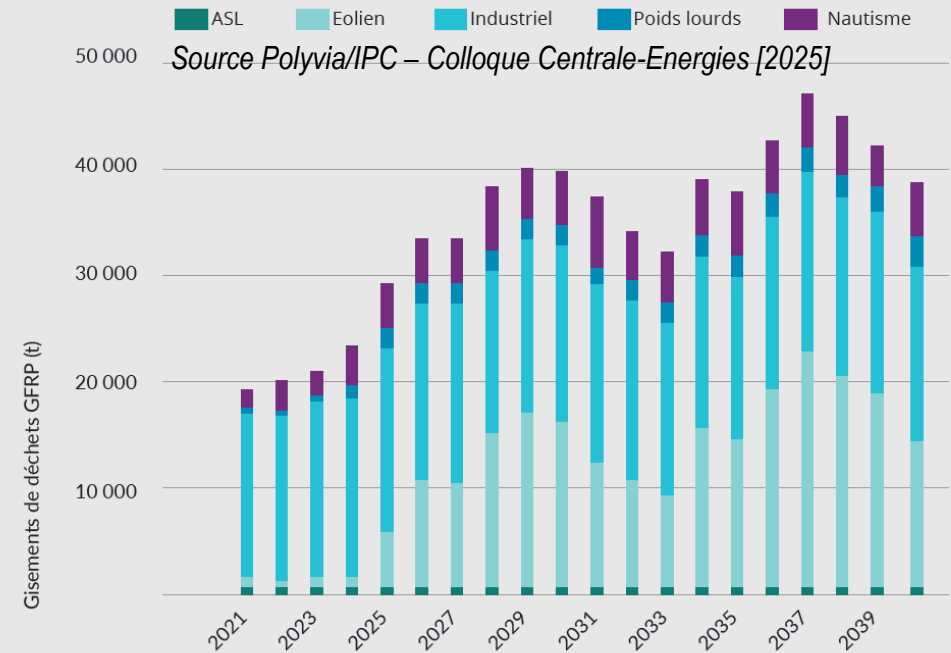
*Fibre d'Elastane®*

# Qu'en-est-il des différentes matières? Les composites

## Des gisements croissants



Gisement de déchets composites hors aéronautique à l'échelle nationale

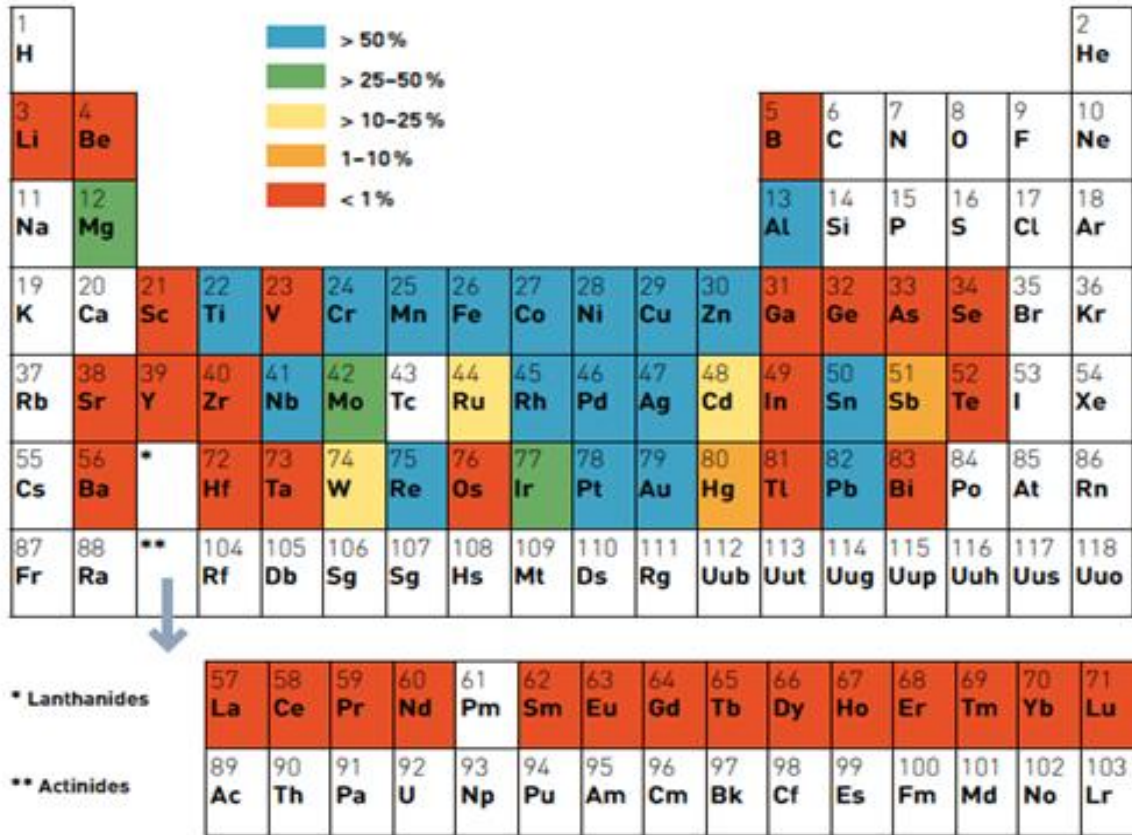


Technologies les plus matures :

Valorisation fibres (FC, FV), matrices car matrices polymère essentiellement thermodurcissables ...

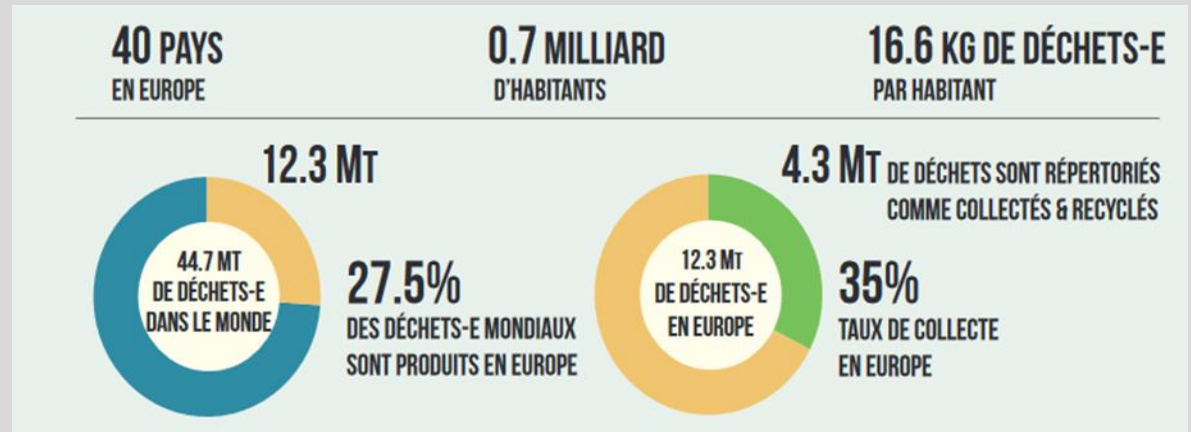
# Et les métaux / terres rares?

Taux de recyclage (source: BRGM)



Présence dans gisements :

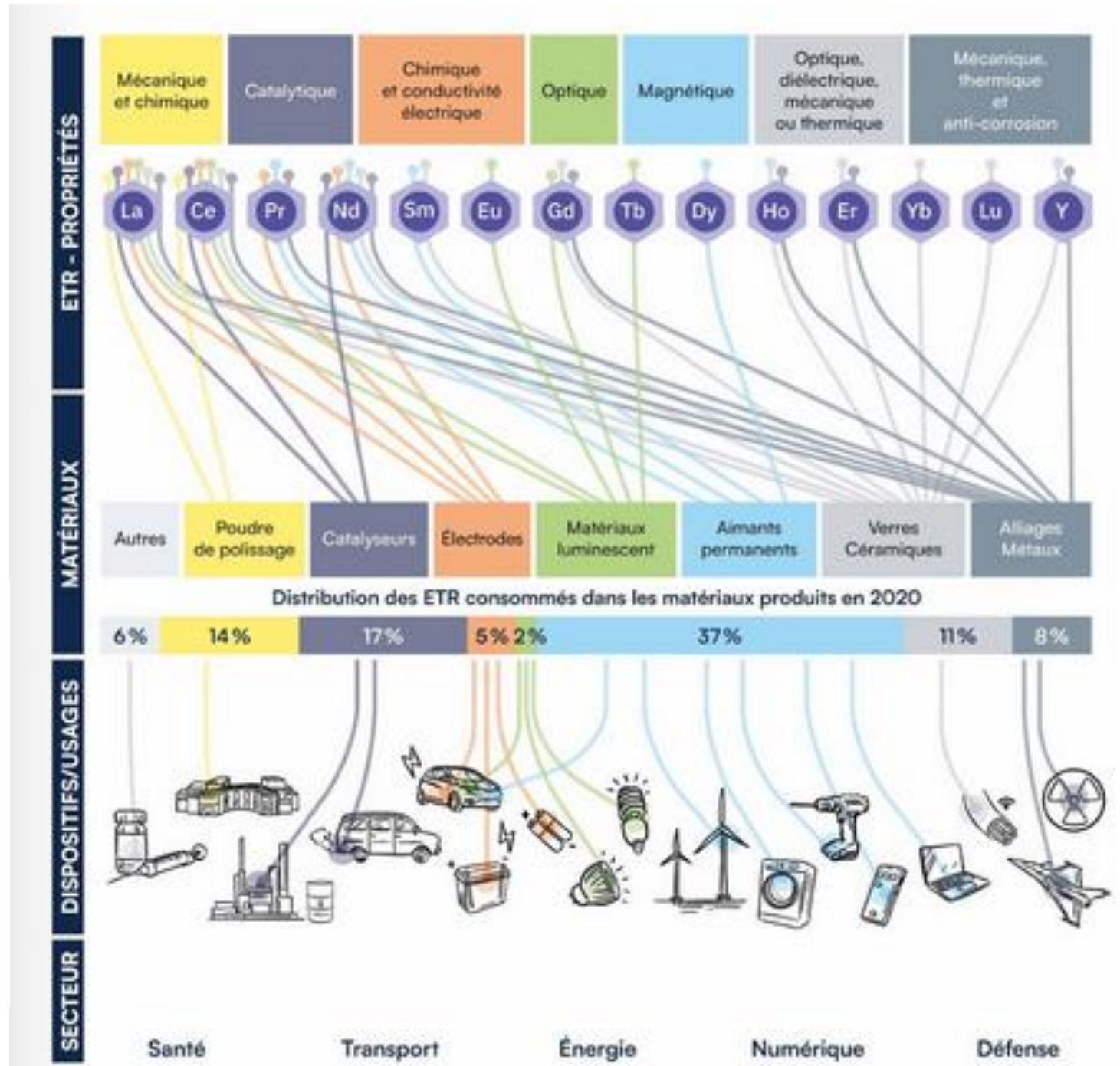
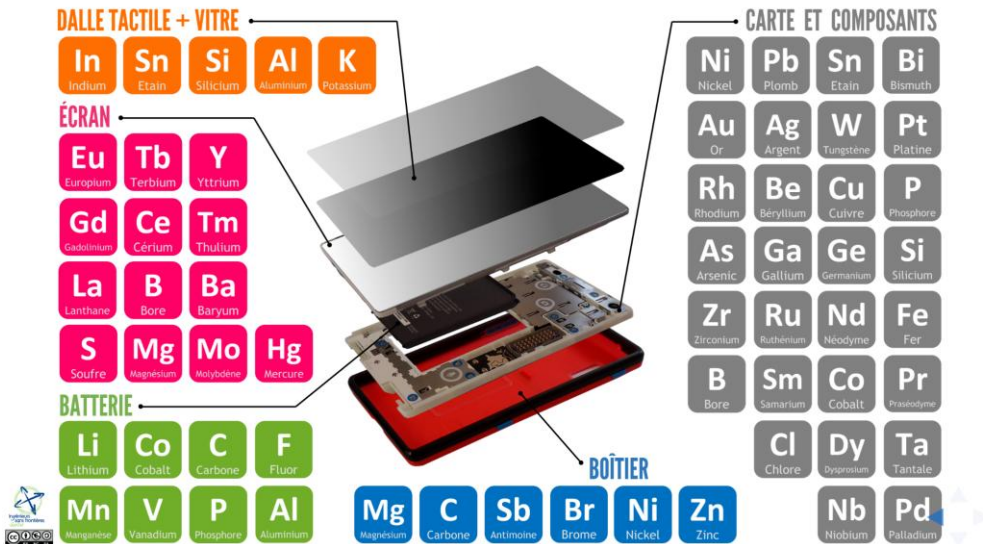
- DEEE Déchets Électronique & Électroménager, IoT, plastronique, etc.
- NTE Nouvelles technologies de l'énergie (Photovoltaïque, H<sub>2</sub>, éolien)
- Batteries



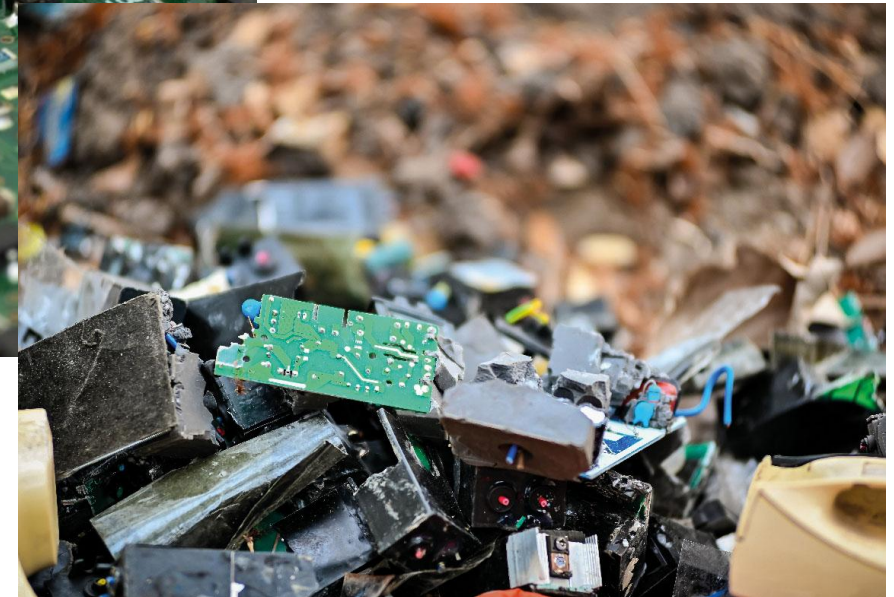
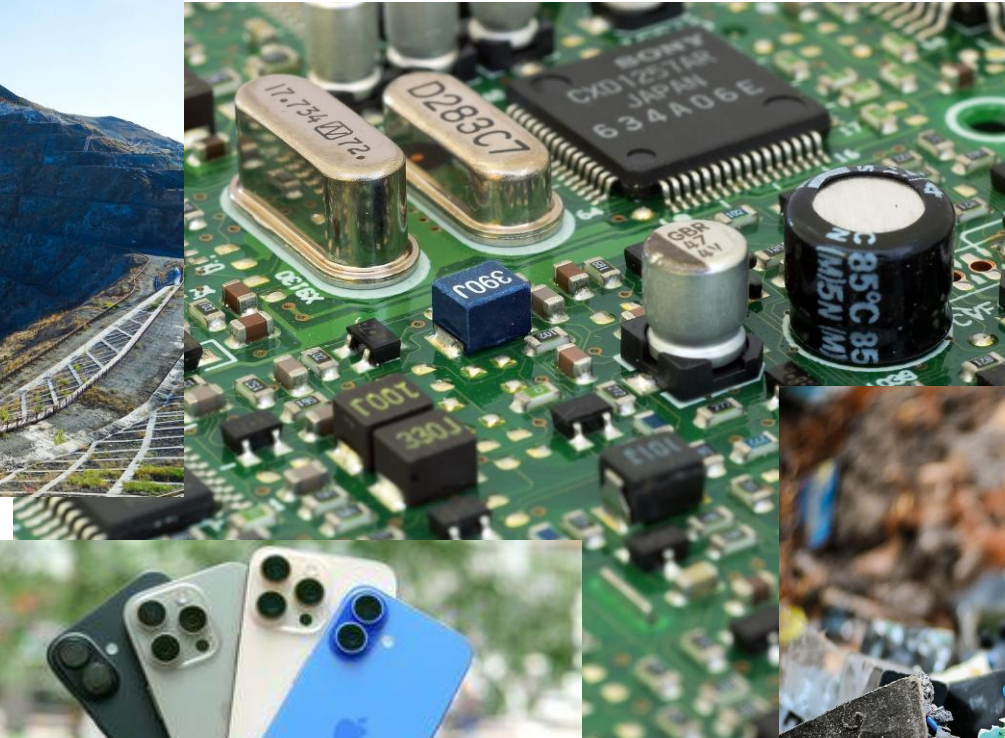
Electrical and electronic equipment waste generated in 2016 in Europe [Baldé, 2017]

# Et les métaux / terres rares ?

**Ces éléments sont intégrés/assemblés dans des objets / produits / dispositifs**

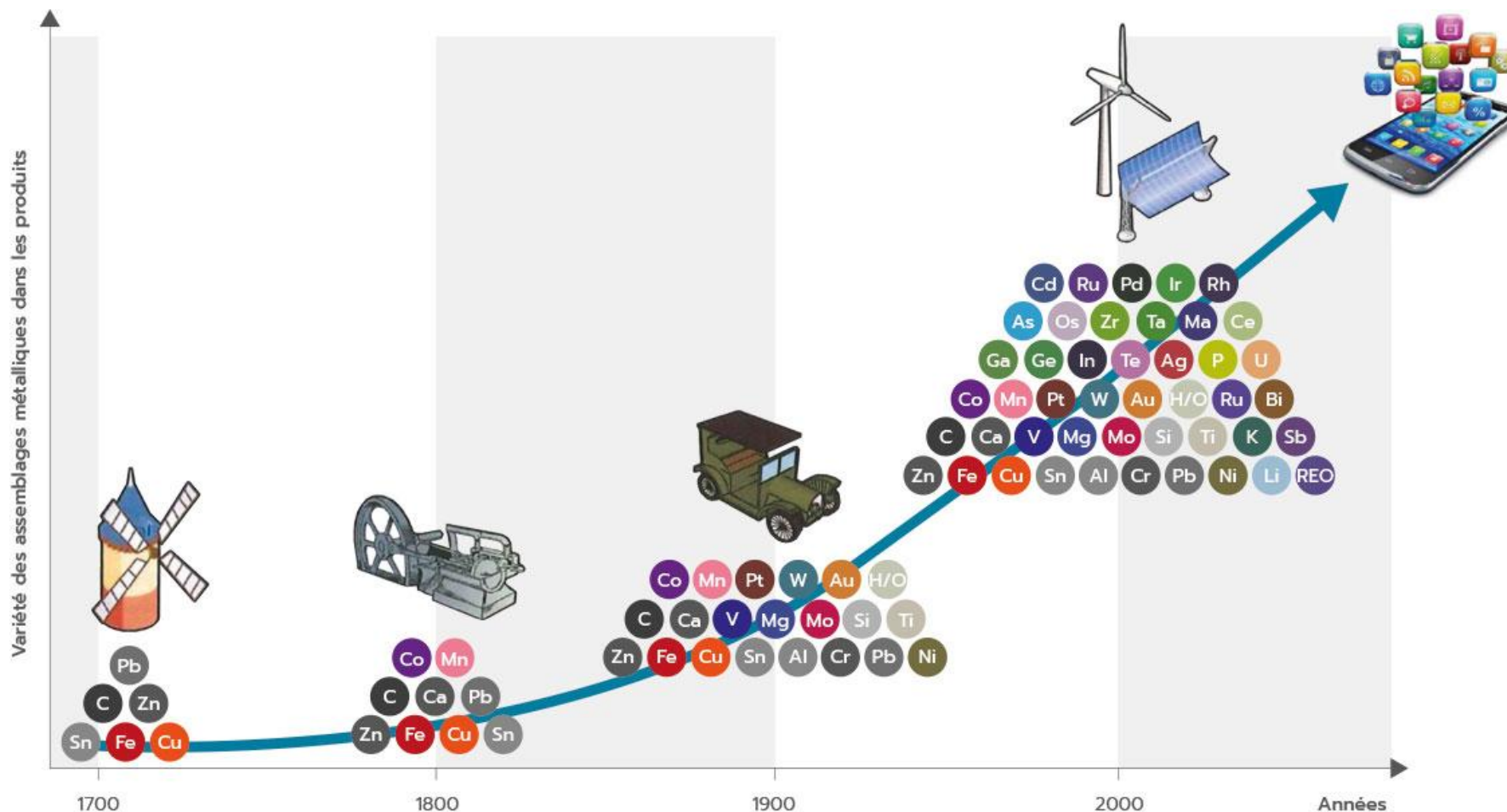


- 1.- INTRODUCTION GENERALE – CONTEXTE GENERAL  
ENJEUX DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE (DES MATIERES)
- 2.- MATERIAUX DU NUMERIQUE ET RECYCLAGE**
- 3.- ECONOMIE CIRCULAIRE DES MATIERES  
REQUIS ET FREINS A LA CIRCULARITE
- 4.- AUTRES MODELES ECONOMIQUES DE CIRCULARITE



# Matières de l'Economie Numérique - Métaux

*Une consommation croissante de métaux mais aussi une variété toujours plus grande...*



# Dispositifs électroniques et numériques : Grande consommation de métaux

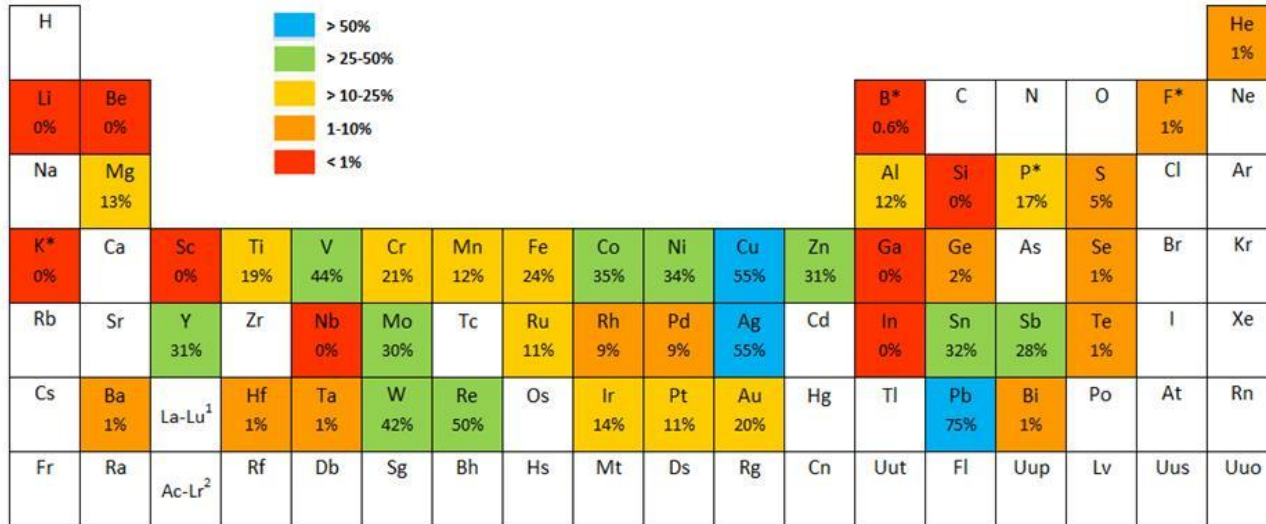
## *Part de la production mondiale consommée par l'industrie de l'électronique*

	Métaux	Utilisations	% de la production mondiale
<i>Métaux de base :</i>	<b>Cuivre</b> (Cu)	Câbles, fils, connecteurs, transformateurs, moteurs	28 %
	<b>Etain</b> (Sn)	Soudures, alliages de soudures	33 %
	<b>Nickel</b> (Ni)	Batteries Ni-MH, placage finition ENIG	8 %
	<b>Silicium</b> (Si)	Puces électroniques	4 %
<i>Métaux précieux :</i>	<b>Argent</b> (Ag)	Conducteurs, interrupteurs, contacts	30 %
	<b>Or</b> (Au)	Contacts (microprocesseurs ...), fil de liaison	10 %
	<b>Platine</b> (Pt)	Disques durs, fibre optique, contact	6 %
	<b>Palladium</b> (Pd)	Condensateurs multicouche, connecteurs, placage ENEPIG	17 %
<i>Métaux de spécialité / technologiques :</i>	<b>Tantale</b> (Ta)	Condensateurs	66 %
	<b>Antimoine</b> (Sb)	Retardateur de flamme bromé (Substance réglementée RoHS)	50%
	<b>Gallium</b> (Ga)	Semi-conducteurs, LEDs	48 %
	<b>Indium</b> (In)	Écrans LCD (ITO), semi-conducteurs LEDs	70 %
	<b>Germanium</b> (Ge)	Transistors, sensors, fibres optiques	15 %
	<b>Lithium</b> (Li)	Batteries	20 %
	<b>Terres rares</b> (lanthanides)	Aimants, écrans LCD	18 %

# Un recyclage encore très peu développé

## Taux de recyclage des composés

End-of-life recycling input rate (EOL-RIR) [%]



<sup>1</sup> Group of Lanthanide	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
	1%	1%	10%	1%		1%	38%	1%	22%	0%	1%	0%	1%	1%	1%
<sup>2</sup> Group of Actinide	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Aggregates	Bentonite	Coaking Coal	Diatomite	Feldspar	Gypsum	Kaolin Clay	Limestone	Magnesite	Natural Cork	Natural Graphite	Natural Rubber	Natural Teak Wood	Perlite	Sapele wood	Silica Sand	Talc
7%	50%	0%	0%	10%	1%	0%	58%	2%	8%	3%	1%	0%	42%	15%	0%	5%

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

Aujourd'hui, seulement le Cuivre et les métaux précieux sont actuellement récupérés par pyrométallurgie et hydrométallurgie

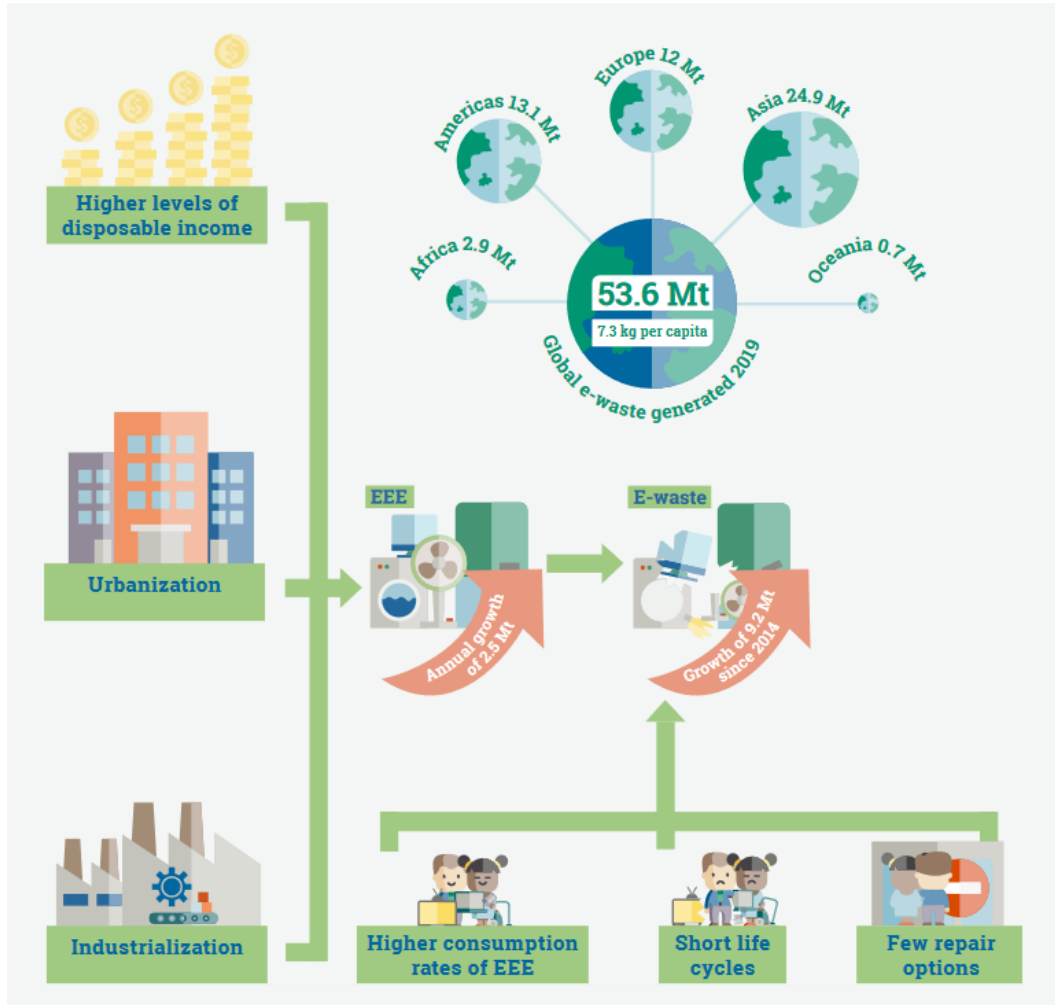
... à ce jour, le Tantale, l'Indium, l'Étain, le Lithium, le Cobalt, l'Antimoine ne sont pas ou peu récupérés.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A52018SC0017>

Gómez et al., Journal of Cleaner Production 2023, 419, 138099; MineralInfo (BRGM); UNEP (2011)

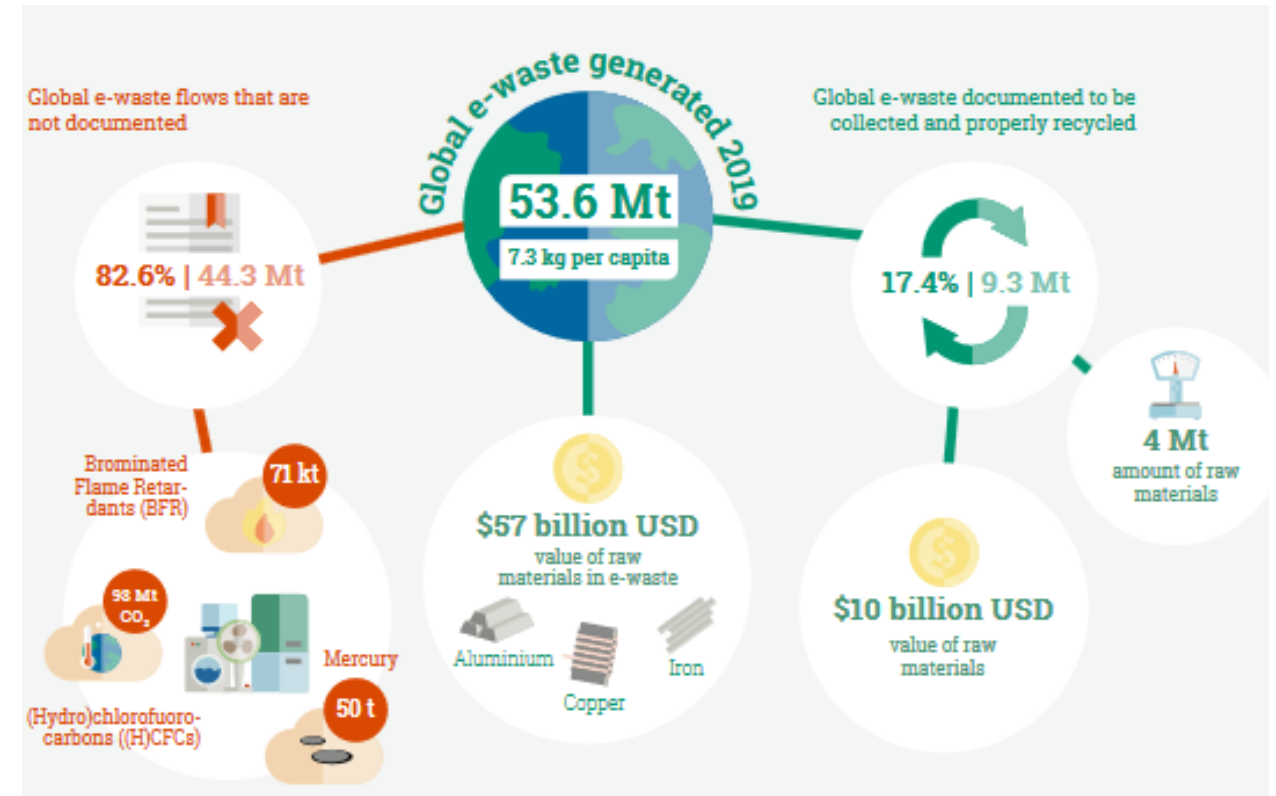
# Recyclage encore très peu développé

*Que représente les déchets d'EEE? Quelle croissance?*



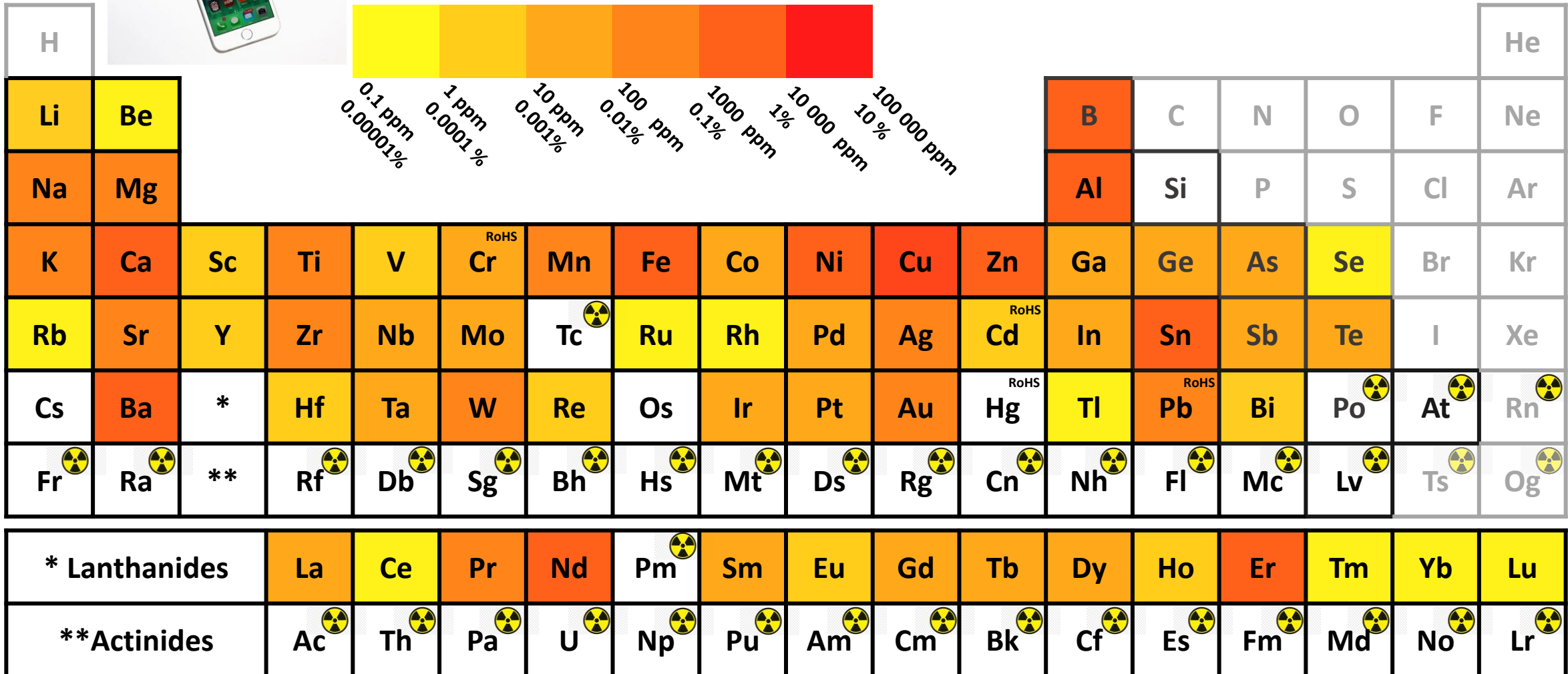
## Europe /

- 1st e-waste generation per capita: 16.2 kg (2019)
- Collection and recycling rates



# Les défis du recyclage des métaux des (D)EEE

*Des nombreux composés mais en concentrations très faibles*  
*Exemple: Composition d'un smartphone*



# Défis de la récupération des métaux critiques

**Des conséquences environnementales liées à la toxicité des matières concernées**

**TABLE 2. Concentrations of Pollutants near Informal Recycling Sites in Guiyu, China (9, 11, 40–45)**

contaminant	air (ng/m <sup>3</sup> )	sediments (mg/kg)	soil (mg/kg)	water (μg/L)
cadmium	7.3 <sup>a</sup> (42)	n.d.–10.3 (41)	5.51–43 <sup>c</sup> (11)	0.073–0.362 (40)
	7.3 <sup>b</sup> (42)		n.d. <sup>d</sup> (11)	
copper	483 <sup>a</sup> (42)	17.0–4.5 (41)	1374–14 253 <sup>c</sup> (11)	5.92–67.3 (40)
	126 <sup>b</sup> (42)		29.5–42.7 <sup>d</sup> (11)	
lead	444 <sup>a</sup> (42)	28.6–590 (41)	856–7038 <sup>c</sup> (11)	1.33–2.24 (40)
	392 <sup>b</sup> (42)		80–93 <sup>d</sup> (11)	
nickel	10 <sup>a</sup> (42)	12.4–543 (41)	85–722 <sup>c</sup> (11)	29.8–66.0 (40)
	7.2 <sup>b</sup> (42)		5.5–20 <sup>d</sup> (11)	
PAH	40.0–347 <sup>a</sup> (42)	0.1–0.51 (9)	0.593 <sup>e</sup> (9)	
	22.7–263 <sup>b</sup> (42)	0.24 <sup>d</sup> (9)	1.0–3.2 <sup>c</sup> (45)	
PCDD/Fs	0.065–2.77 (44)		0.09 <sup>d</sup> (9)	
			0.013–0.090 <sup>f</sup> (43)	
PBDD/F	0.008–0.46 (44)		0.004–0.01 <sup>g</sup> (43)	

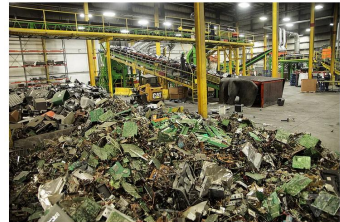
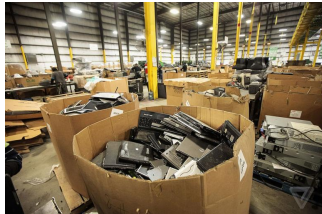
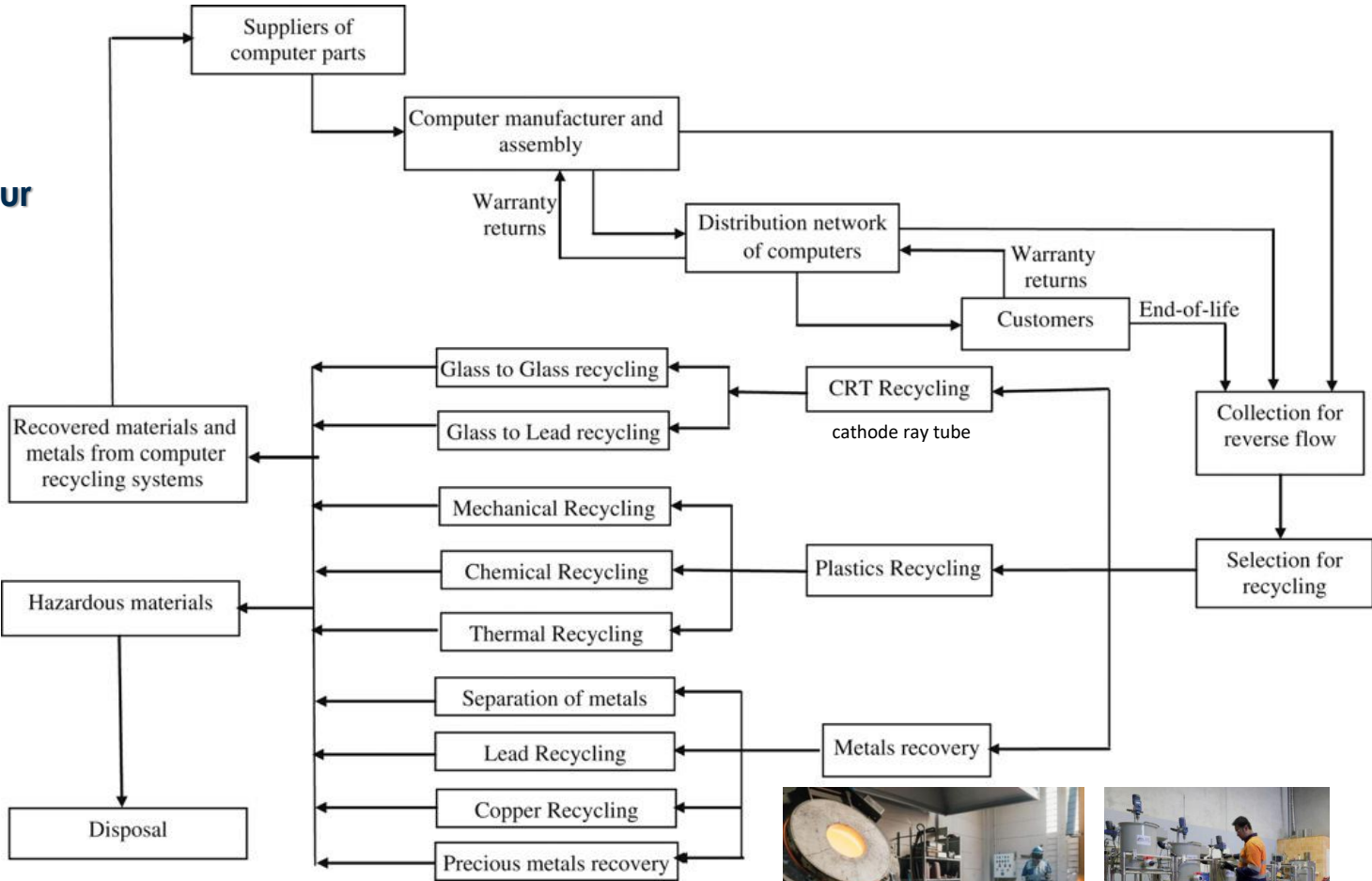
<sup>a</sup> Associated with total suspended particles. <sup>b</sup> Associated with Particulate matter with diameter smaller than 2.5 μm. <sup>c</sup> At open burning site. <sup>d</sup> At reservoir. <sup>e</sup> At printer roller dump soils. <sup>f</sup> At acid leaching facilities. <sup>g</sup> At duck pond close to open burning site.

# Recyclage des matières du numérique/DEEE

## Séparation des matières présentes dans les produits nécessaire

Après démantèlement, recyclage spécifique pour chaque matière:

- Verre
- Plastiques
- Métaux



Reverse logistics framework for computer hardware recycling.

# Recyclage des objets du numérique/DEEE

## Rappel: Que contiennent les 'mines' (gisements de produits) du numérique?



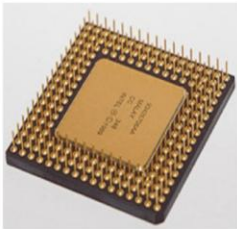
1. Inside of a desktop casing



2. Power supply box



3. Motherboard



4. CPU (Intel pentium)



5. Memory modules



6. PCI card



7. CD/DVD drive



8. Floppy disk drive



9. Hard drive



10. Cables



11. Heat sink with fan



12. Connectors

### Exemples:

- Ordinateur PC
- Moniteurs LCD

Material composition of dismantled desktop case (Kida, 2010).

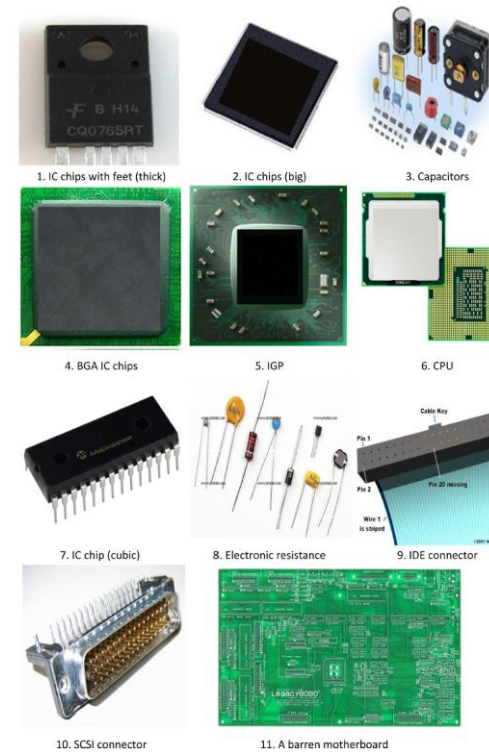
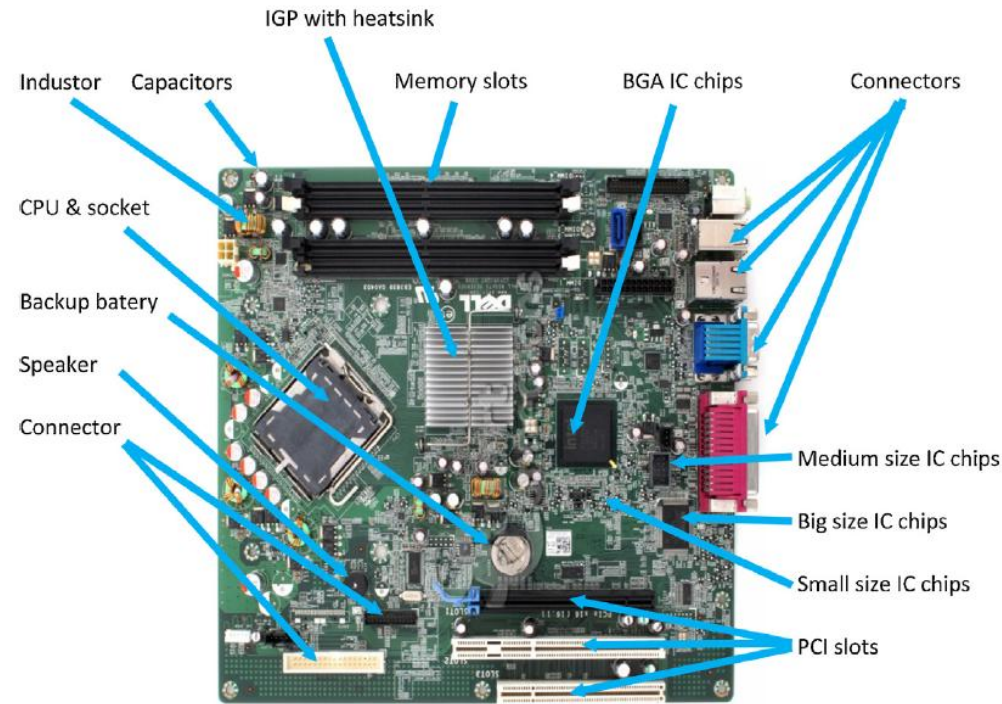
Name of the components	Weight (g)	Weight (%)
No 1 Metal (Outer frames)	6571	49.8%
No 2 Plastic	306	2.3%
No 3 Screws	44	0.3%
No 4 Mother board 1	564	4.3%
No 5 Mother board 2	253	1.9%
No 6 Graphics card	109	0.8%
No 7 Memory Module (2pieces)	2595	19.7%
No 8 CPU	251	1.9%
No 9 CD drive	338	2.6%
No 10 Floppy drive	463	3.5%
No 11 Hard drive	461	3.5%
No 12 Wires	104	0.8%
No 13 Power boards	1146	8.7%
Total	13205	100.0%

Material balance of dismantled LCD monitors (Kida, 2010).

Name of the Scraps	Weight (kg)	Weight (%)
No 1 PCB	0.124	2.0%
No 2 Power boards	0.186	3.0%
No 3 CCFL tubes	0.124	2.0%
No 4 LCD panel	3.038	49.0%
No 5 Metals	1.116	18.0%
No 6 Speakers	0.248	4.0%
No 7 Plastics	1.178	19.0%
No 8 Other materials	0.186	3.0%
Total	6.2	100.0%

# Recyclage des objets du numérique/DEEE

**Rappel: Que contiennent les 'mines' (gisements de produits) du numérique?**



K.M.H. Al Razi et al, Res., Conserv. & Recycling, 110, (2016) 30-47

Metal contents (mg/Kg) in the PCBs of waste desktop computers.

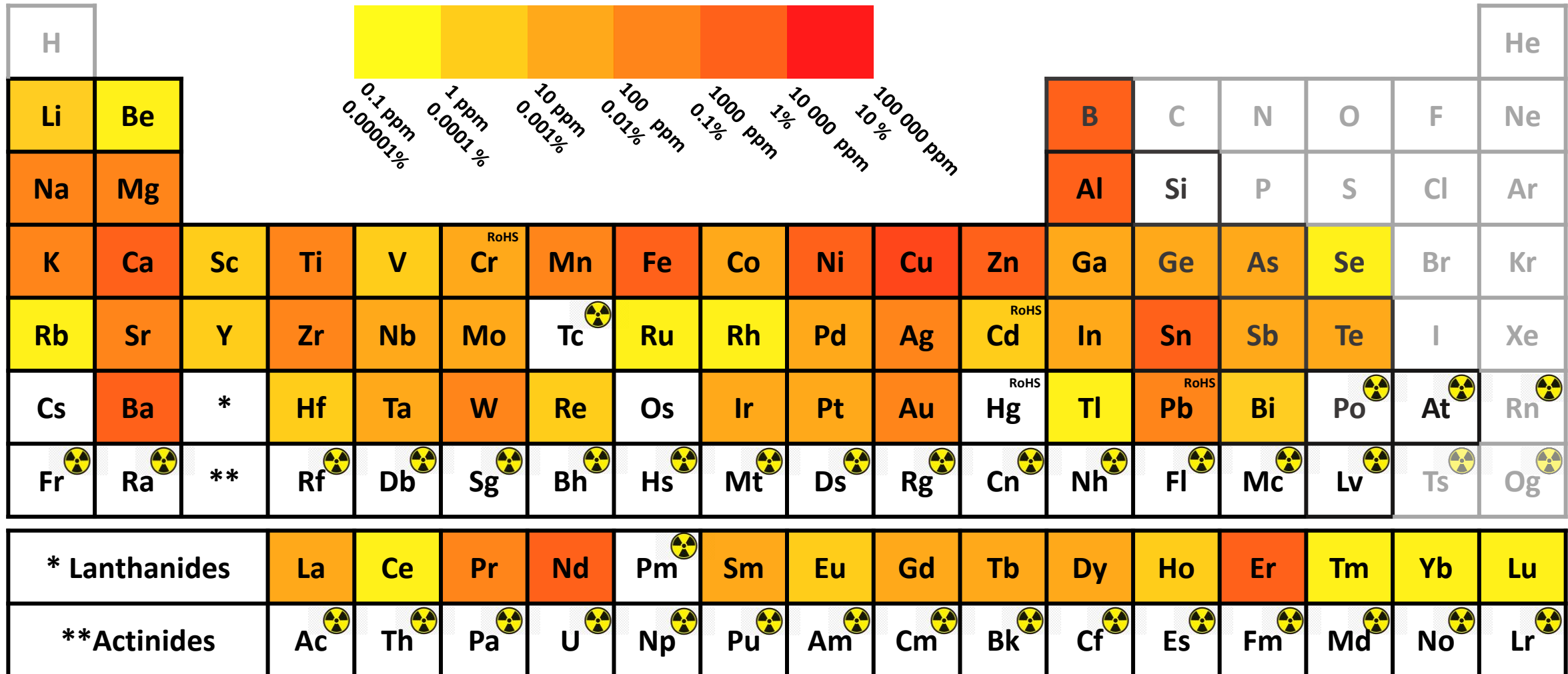
Type of PCBs	Weight/ piece (g)	Ag (g/kg)	Au (g/kg)	Pd (g/kg)	Al (g/kg)	Cu (g/kg)	Fe (g/kg)	Ni (g/kg)	Zn (g/kg)	Nd (g/kg)	Sn (g/kg)	Sb (g/kg)	Pb (g/kg)
PCBs of HDD drive (Kida, 2010)	84	0.087	0.013	0.014	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Memory modules(Li and Xu, 2015)	20	0.79	823	0.05	-	132	-	-	-	-	-	-	-
PCI cards (Kida, 2010)	62	0.073	0.015	0.01	7.1	20.4	3.8	0.14	0.1	0.01	1.5	0	1.05
PCBs of LCD monitors	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Motherboards (Kida, 2010)	459	0.35	0.067	0.089	58	77.1	3.99	1.21	0.1	0.06	14	0.02	8.89
Power boards (JX, 2010)	2000	0.68	-	-	26	120	61	6.4	10	-	22	1.4	11



# Recyclage des objets du numérique/DEEE

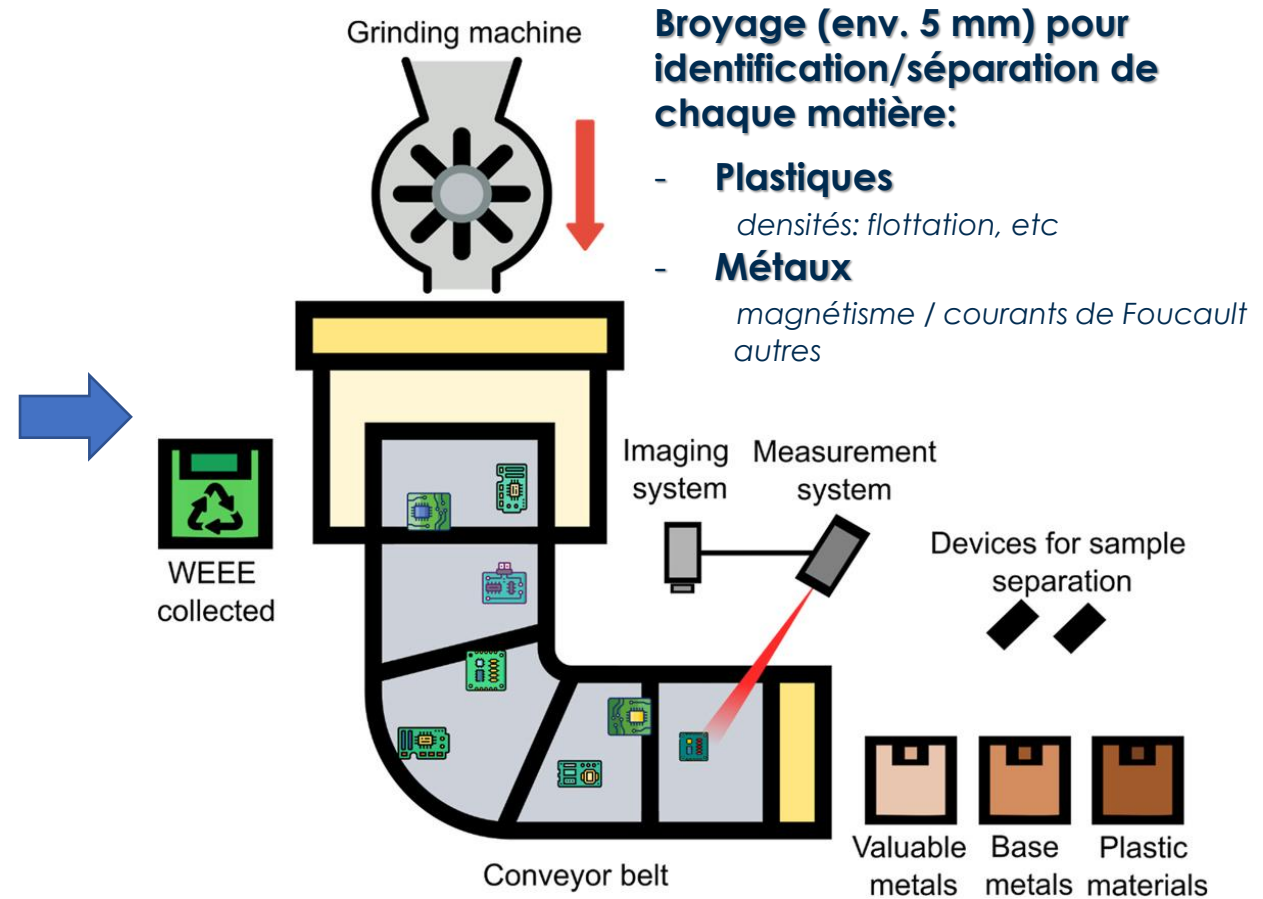
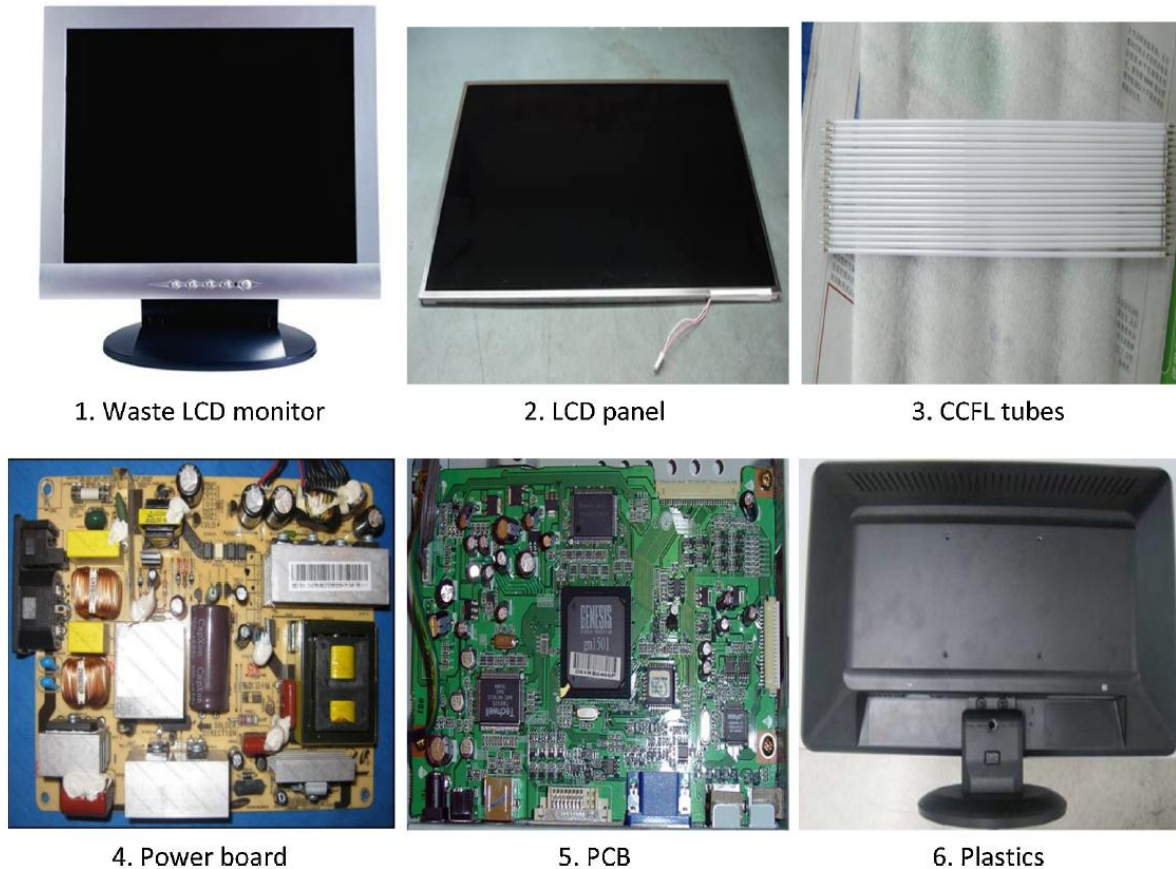
*Que contiennent les 'mines' (gisements de produits) du numérique?*

Les métaux, les matières de la plus grande valeur, donc les plus pertinentes à extraire des différents éléments...



# Recyclage des objets du numérique/DEEE

*Une chaîne de recyclage en bref: un assemblage d'étapes et de procédés*

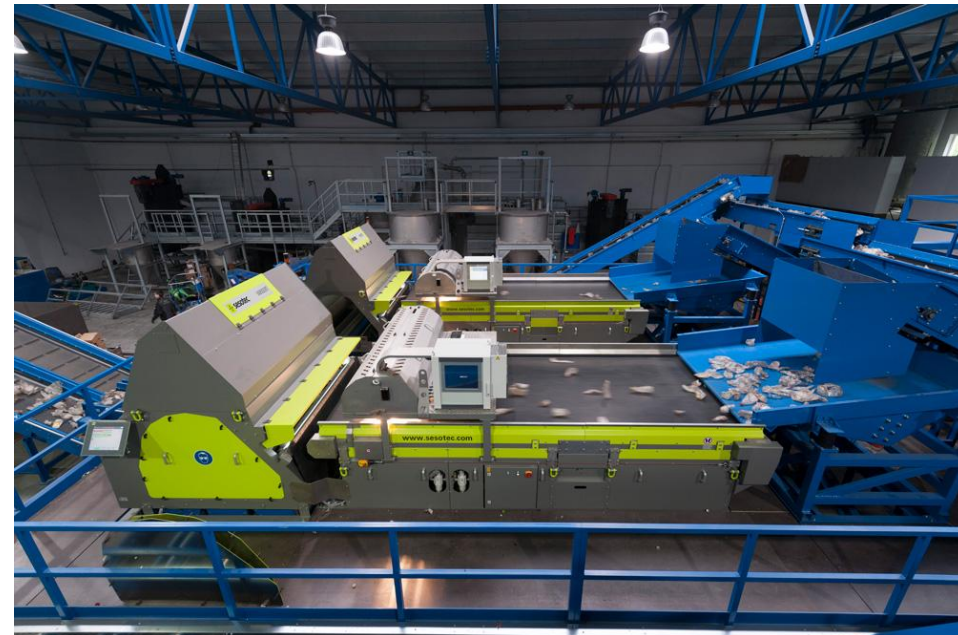


# Recyclage des objets du numérique/DEEE

*Chaîne de tri et broyage DEEE*

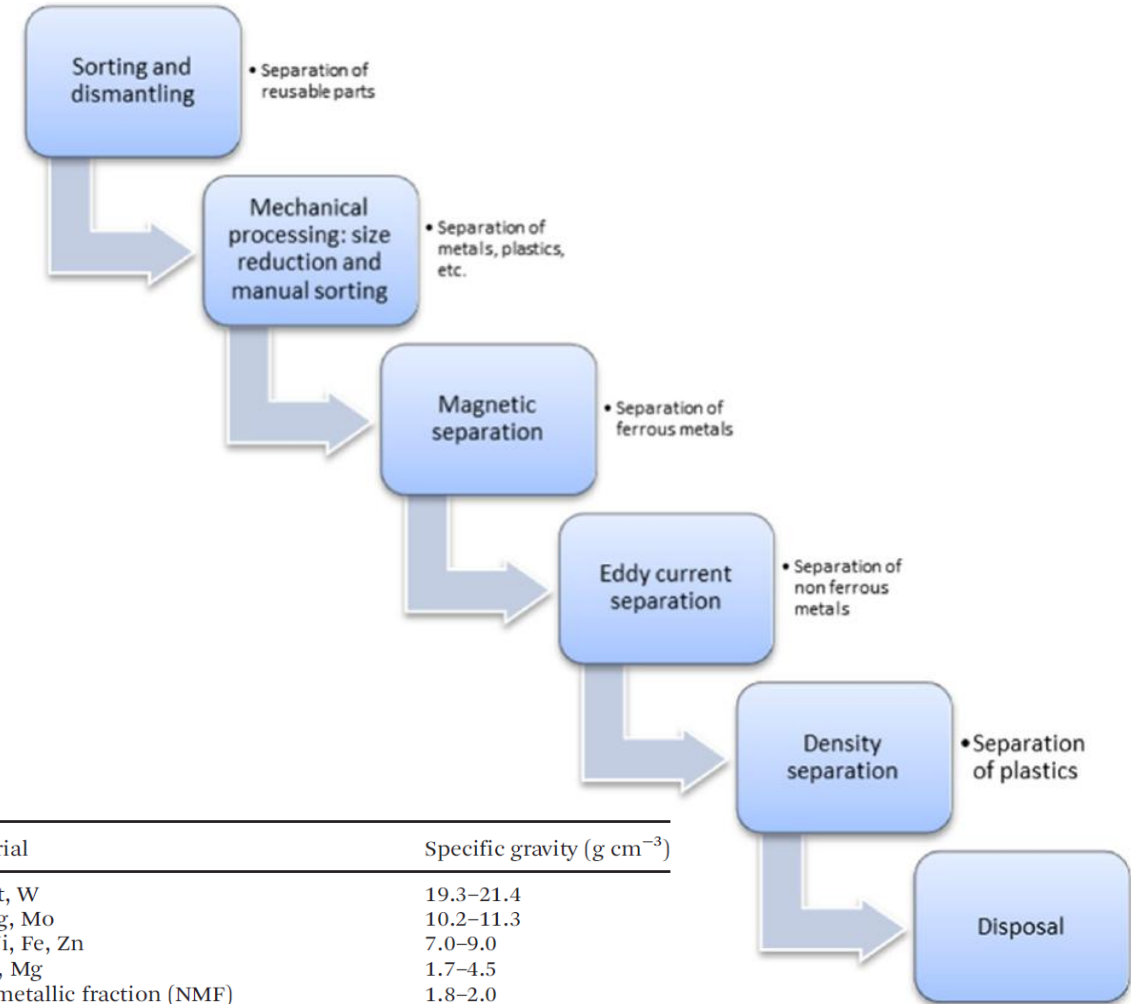
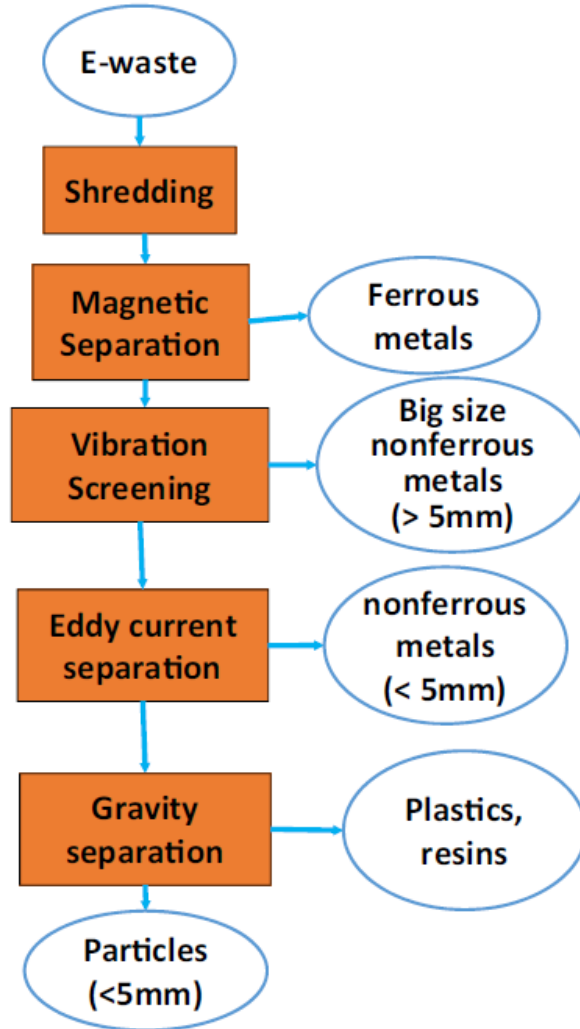


Photo by Amelia Holowaty Krales / The Verge



# Recyclage des objets du numérique/DEEE

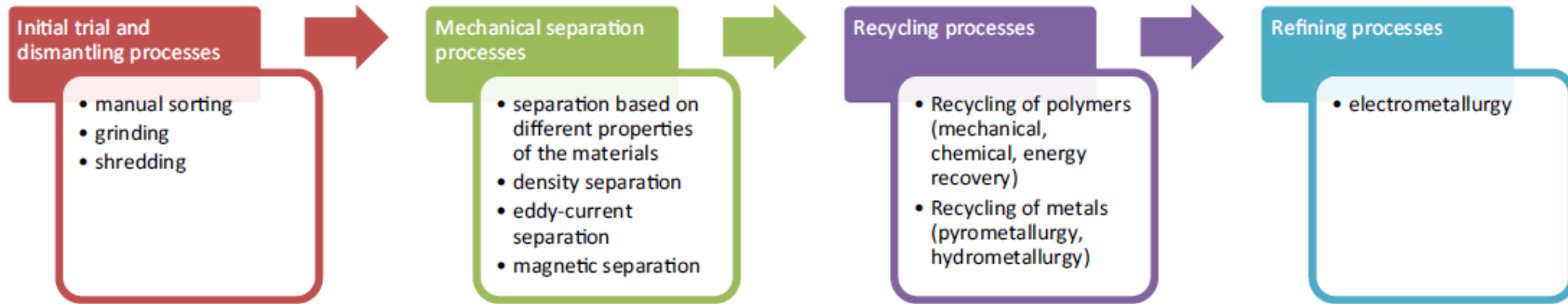
## Chaîne de tri et broyage DEEE – Séparation des matières



Material	Specific gravity ( $\text{g cm}^{-3}$ )
Au, Pt, W	19.3–21.4
Pb, Ag, Mo	10.2–11.3
Cu, Ni, Fe, Zn	7.0–9.0
Al, Ti, Mg	1.7–4.5
Non-metallic fraction (NMF)	1.8–2.0

# Recyclage des objets du numérique/DEEE

## Chaîne de tri et broyage DEEE – Séparation des matières



M.A. Charitopoulou et al., *Env. Sci. A Poll. Res.* (2021), 28, 59190

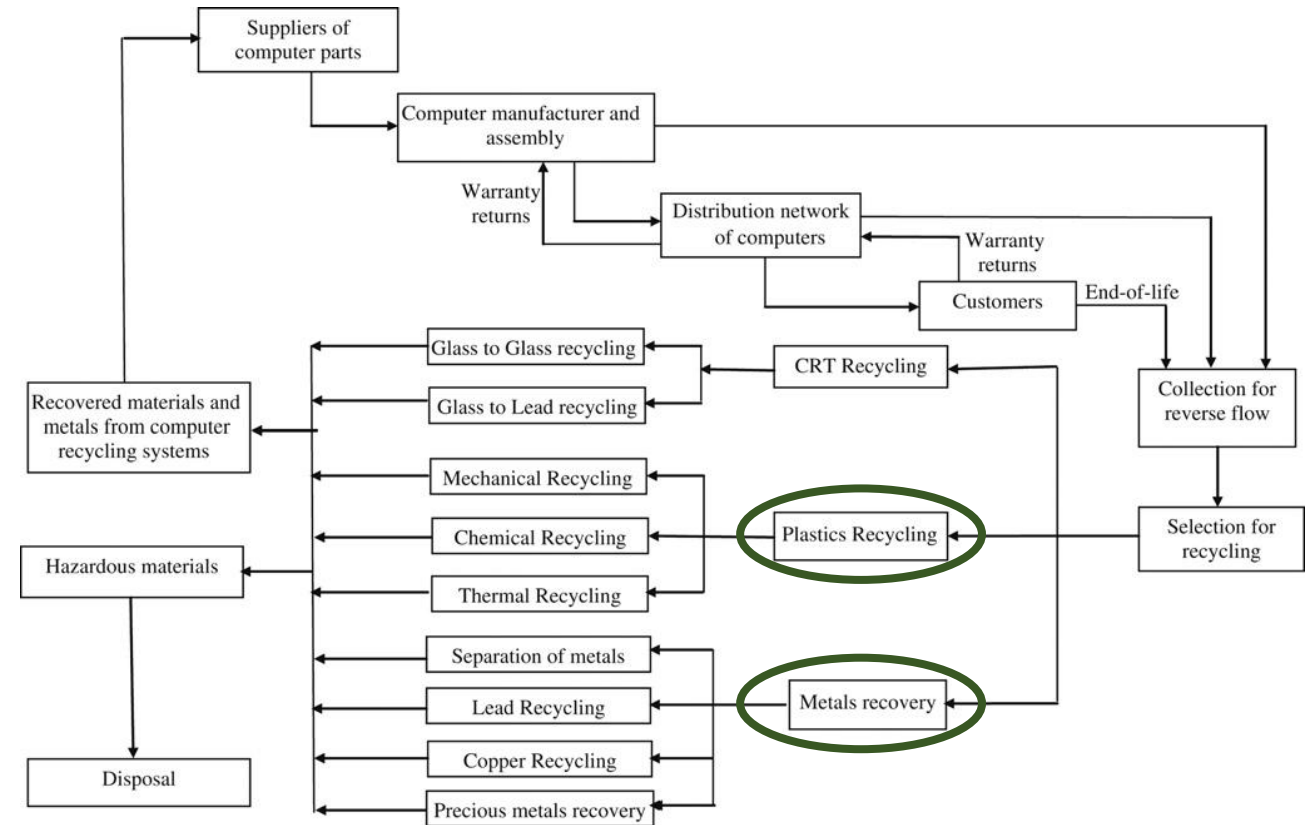
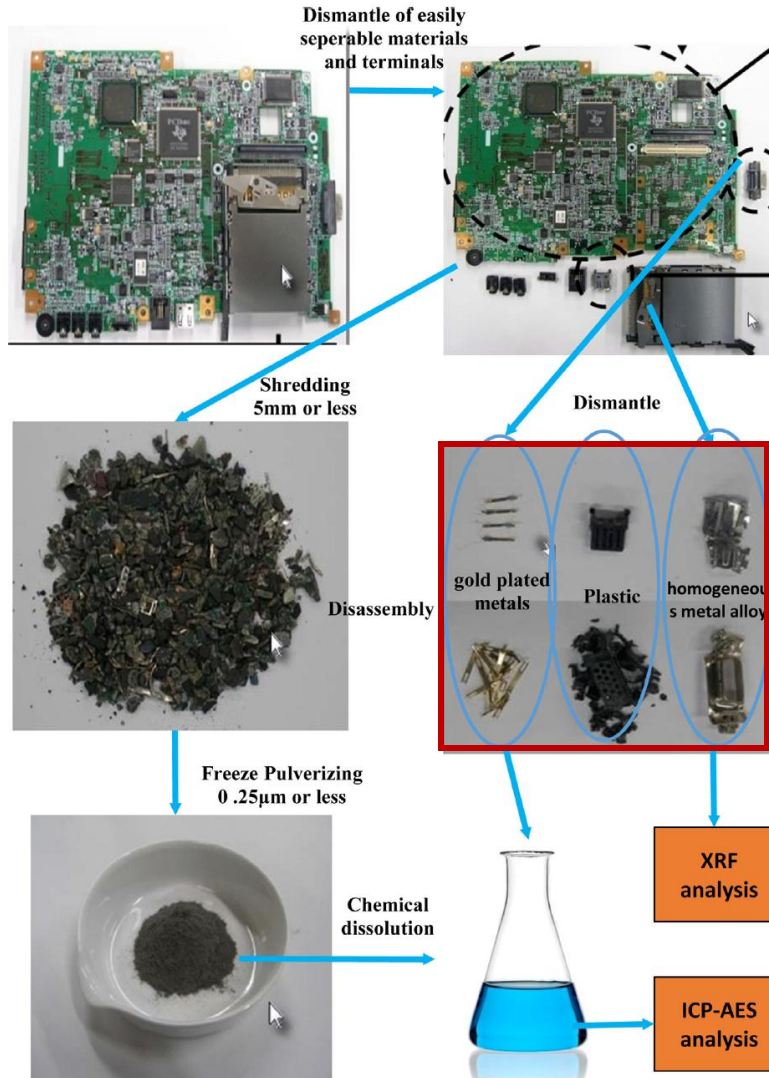
### Percentage of metal content in washed powder from the processing of printed circuit boards from obsolete computers

Metals	Percent (%)
Cu	2.85 ± 0.01
Al	3.71 ± 0.02
Zn	0.09 ± 0.005
Sn	3.09 ± 0.15
Ti	<0.1
Ni	0.05 ± 0.002

L.A. Castro et al., *Braz. J. Chem. Engng.* 200926, 26, 04, 649

# Recyclage des objets du numérique/DEEE

## Recyclage des matières des déchets EEE



V. Ravi, J. Cleaner Prod., 20 (2012) 145-151

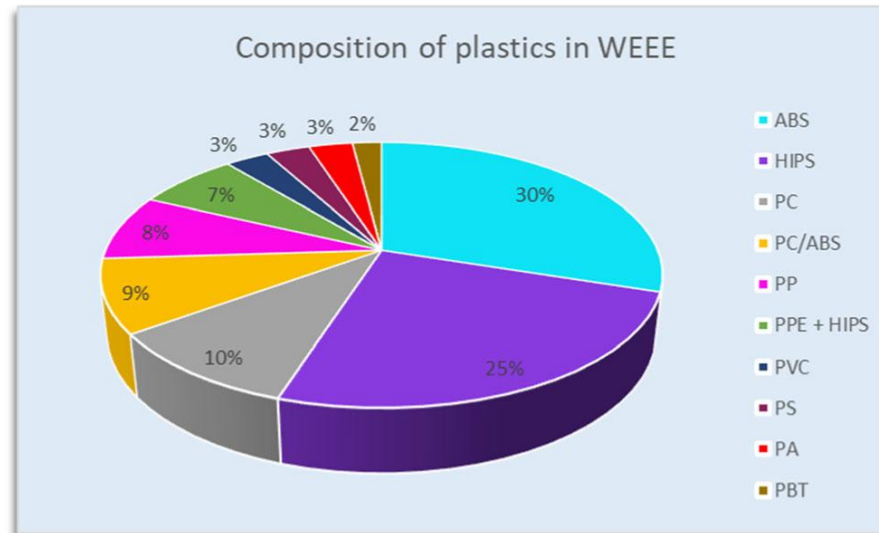
**Méthodes spécifiques de recyclage suivant le type de matériau (plastiques vs. métaux)**



# Recyclage des objets du numérique/DEEE

## Recyclage des matières plastiques des déchets EEE

Diversité des plastiques présents (plastiques dits 'techniques') y compris en mélanges



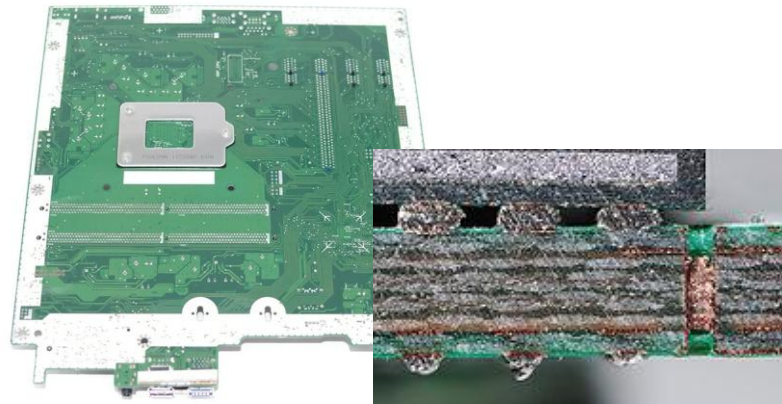
M.A. Charitopoulou et al., *Env. Sci. A Poll. Res.* (2021), 28, 59190

**Thermoplastiques**  
(fusibles, solubles dans solvants spécifiques)

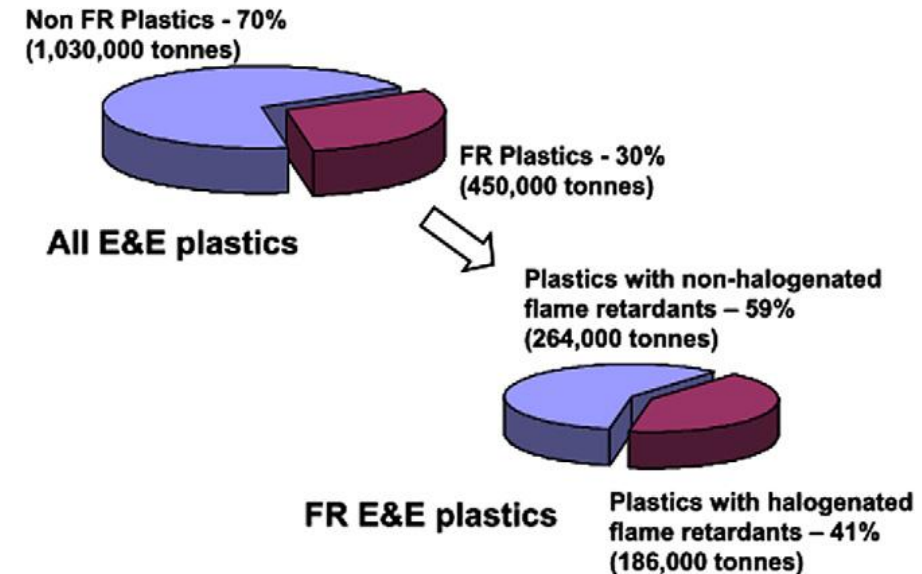


**Thermodurcissables**

- (non fusibles, non solubles)
- Carte-mère; composite verre-époxy
  - Encapsulants: époxy, silicones
  - Adhésifs: époxy, PU, silicone, acrylate



Usage EEE implique normes 'feu' impliquant des additifs anti-feu (flame-retardants) ...

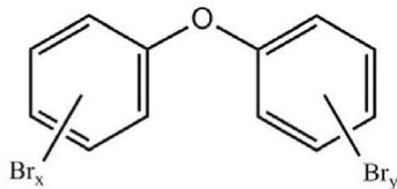


X. Yang et al., *Waste Management* 33 (2013) 462–473

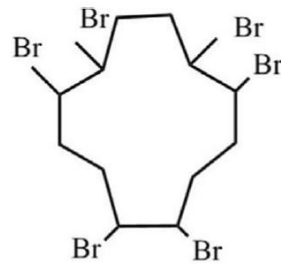


Usage EEE implique normes 'feu' impliquant des additifs anti-feu (flame-retardants)

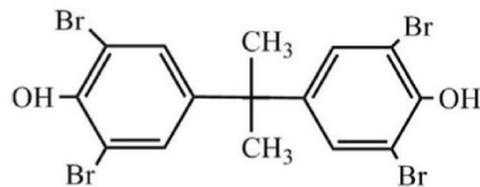
Retardateurs de flamme bromés



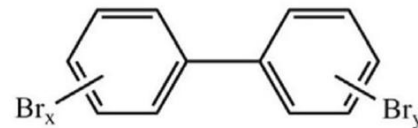
PBDE



HBCD



TBBPA



PBB

M.A. Charitopoulou et al., *Env. Sci. A Poll. Res.* (2021), 28, 59190

Toxicité des retardateurs de flamme

BFRs	Health risks
PBDEs	Cryptorchidism
PBDEs	OHCs present in the serum of pregnant women would transfer over the placenta to the infants
PBDEs	Diabetes
PBDEs	Highest exposure individual scored five less IQ points
TBBPA	Current use of TBBPA may be a matter of concern for human health
TBBPA	Affected three different proteins involved in important processes of neonatal brain development
HBCD	HBCD may disrupt TH-mediated brain development
HBCD	HBCD can potentially impact the thyroid system of fish

X. Yang et al., *Waste Management* 33 (2013) 462–473

Restricted substances	Maximum permitted concentration in EEE
Cadmium (Cd)	< 100 ppm
Lead (Pb)	< 1000 ppm
Mercury (Hg)	< 1000 ppm
Hexavalent chromium: (Cr VI)	< 1000 ppm
Polybrominated biphenyls (PBB)	< 1000 ppm
Polybrominated diphenyl ethers (PBDE)	< 1000 ppm
Bis(2-ethylhexyl) phthalate (DEHP)	< 1000 ppm
Benzyl butyl phthalate (BBP)	< 1000 ppm
Dibutyl phthalate (DBP)	< 1000 ppm
Diisobutyl phthalate (DIBP)	< 1000 ppm

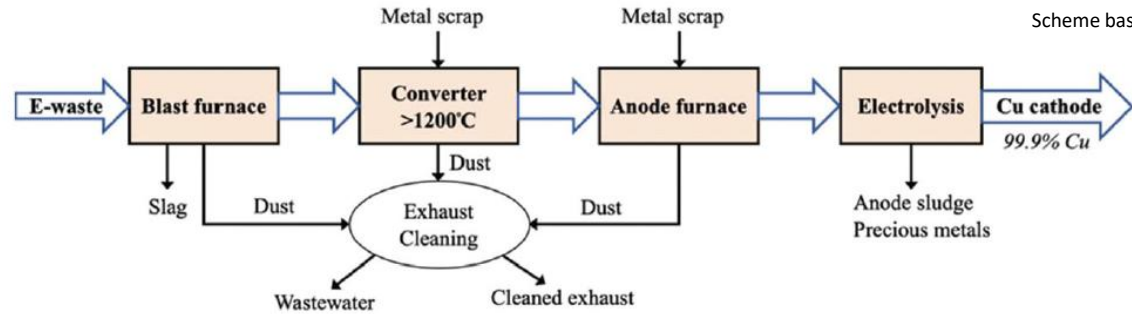
M.A. Charitopoulou et al., *Env. Sci. A Poll. Res.* (2021), 28, 59190

**Réglementations de plus en plus restrictives sur composés mais présence dans DEEE d'aujourd'hui des produits Y-20 ans ou moins**

# Recyclage des objets du numérique/DEEE

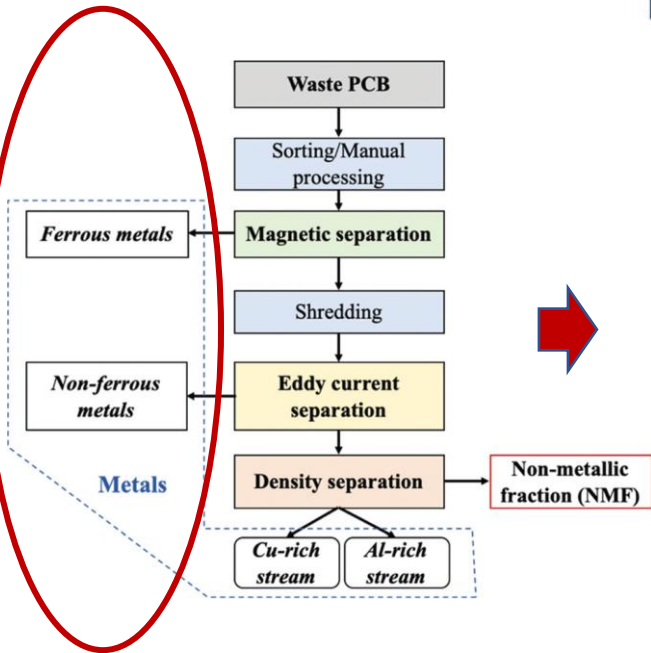
## Recyclage des métaux des déchets EEE

### Recyclage (chimique) par pyrométallurgie

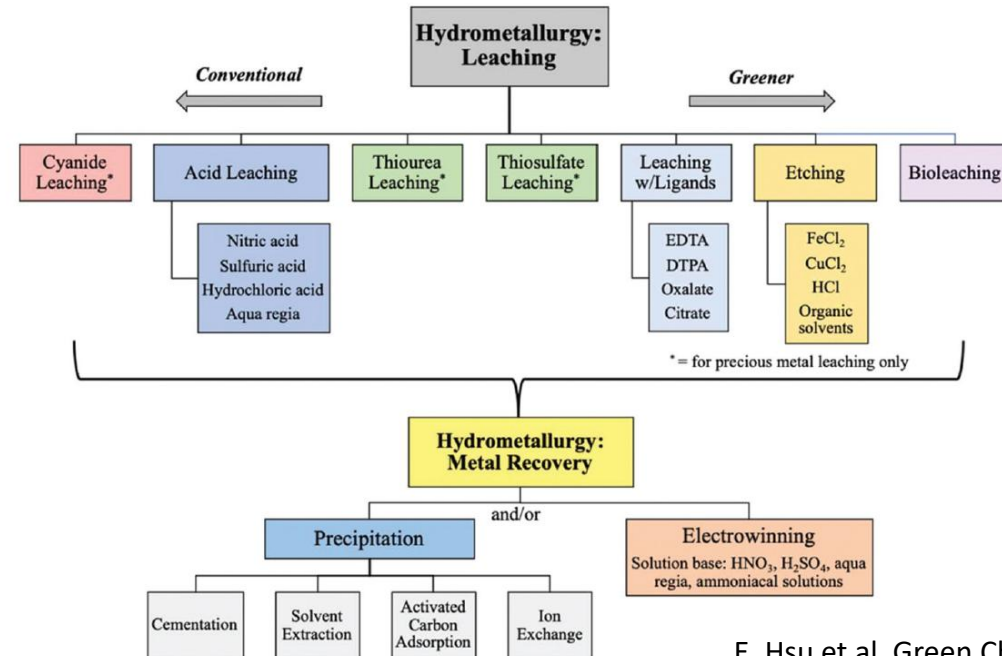


M. Teller, Recycling of Electronic Waste Material, in Sustainable Metals Management, 2006, 563–576

### et hydrométallurgie



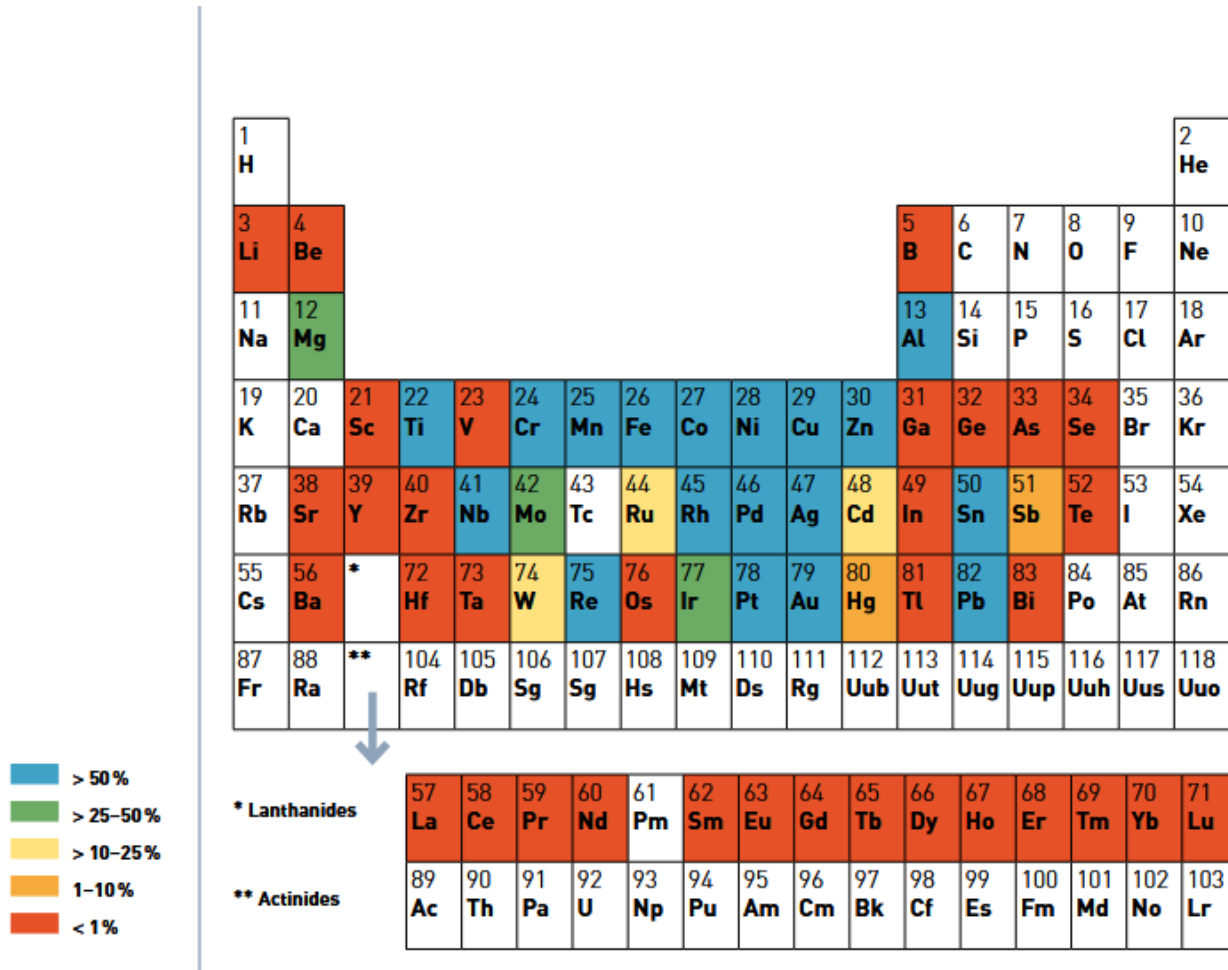
E. Hsu et al, Green Chem., 2019, 21, 919



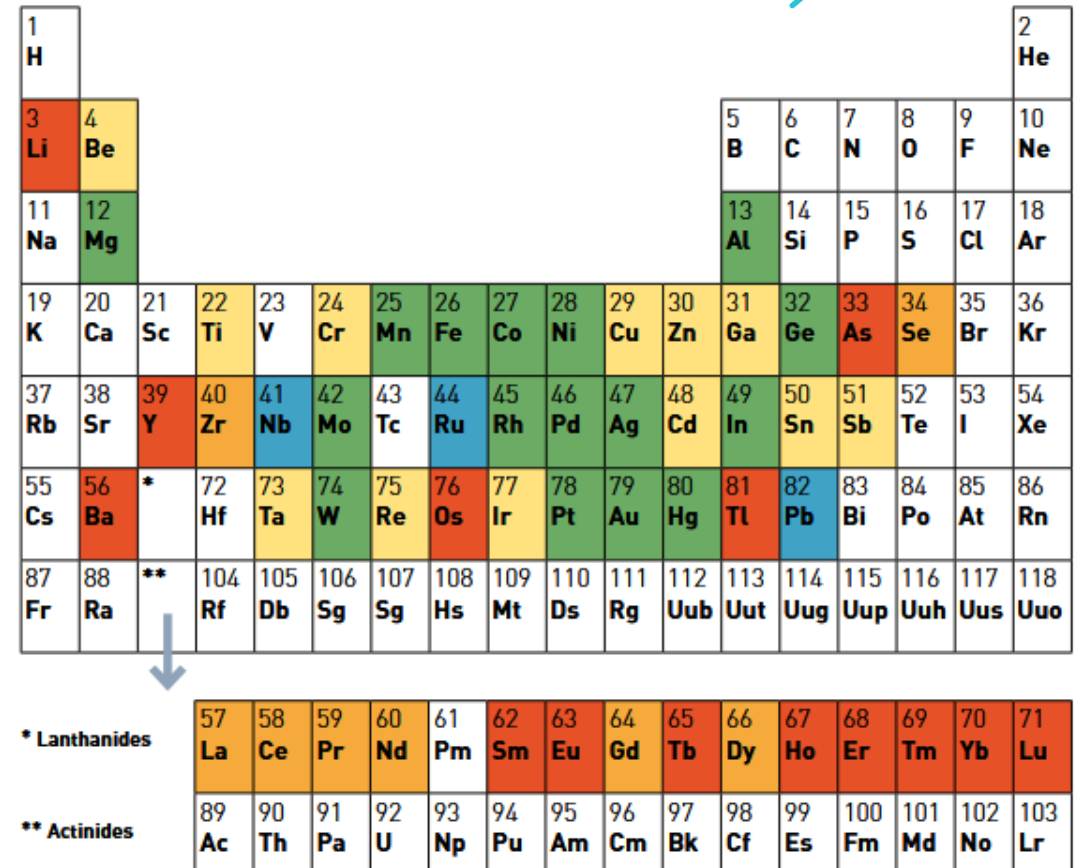
E. Hsu et al, Green Chem., 2019, 21, 919

# Recyclage des matières du numérique/DEEE

## Le taux de recyclage et sa métrique



End-of-Life (post-consumer) functional recycling (EOL-RR)



Global average recycled content (RC)\*

(\*) Fraction of secondary metal in the total metal input to metal production

# Sommaire

- 1.- INTRODUCTION GENERALE – CONTEXTE GENERAL  
ENJEUX DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE (DES MATIERES)
- 2.- MATERIAUX DU NUMERIQUE ET RECYCLAGE
- 3.- ECONOMIE CIRCULAIRE DES MATIERES**  
REQUIS ET FREINS A LA CIRCULARITE
- 4.- AUTRES MODELES ECONOMIQUES DE CIRCULARITE

# CIRCULARITE & MATERIAUX

## Economie 'linéaire' vs. économie 'circulaire'

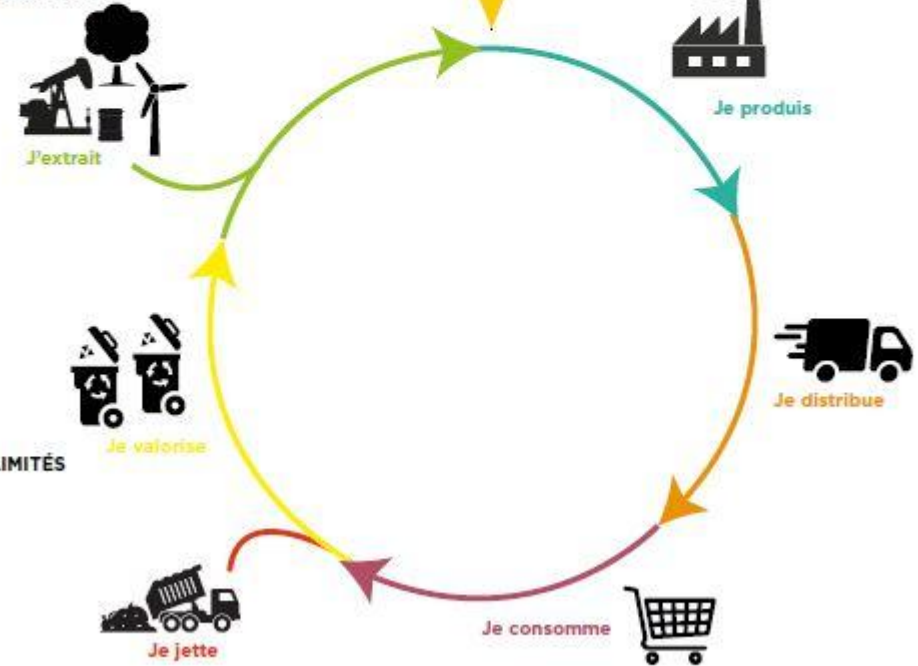
RESSOURCES INFINIES

DÉCHETS ILLIMITÉS



D'UNE ÉCONOMIE LINÉAIRE...

RESSOURCES LIMITÉES



DÉCHETS LIMITÉS

... VERS UNE ÉCONOMIE CIRCULAIRE

Économie circulaire — Vocabulaire, principes et recommandations pour la mise en œuvre

Circular economy — Vocabulary, principles and guidance for implementation

ISO 59004

Première édition  
2024-05

3.1.1

économie circulaire

système économique (3.1.2) qui utilise une approche systémique pour maintenir un flux circulaire des ressources (3.1.6), en recouvrant, conservant ou augmentant leur valeur (3.1.7), tout en contribuant au développement durable (3.1.11)

# CIRCULARITE & MATERIA

## Economie 'linéaire' vs. économie 'circulaire'

*Economie circulaire définie par une norme*

**Économie circulaire — Vocabulaire, principes et recommandations pour la mise en œuvre**

*Circular economy — Vocabulary, principles and guidance for implementation*

**ISO 59004**

**Première édition  
2024-05**

**INSA** INSTITUT NATIONAL  
DES SCIENCES  
APPLIQUÉES  
LYON



Ingénierie  
Matériaux  
Polymères

ISO 59004:2024(fr)

**Tableau 1 — Recommandations relatives aux actions de gestion des ressources**

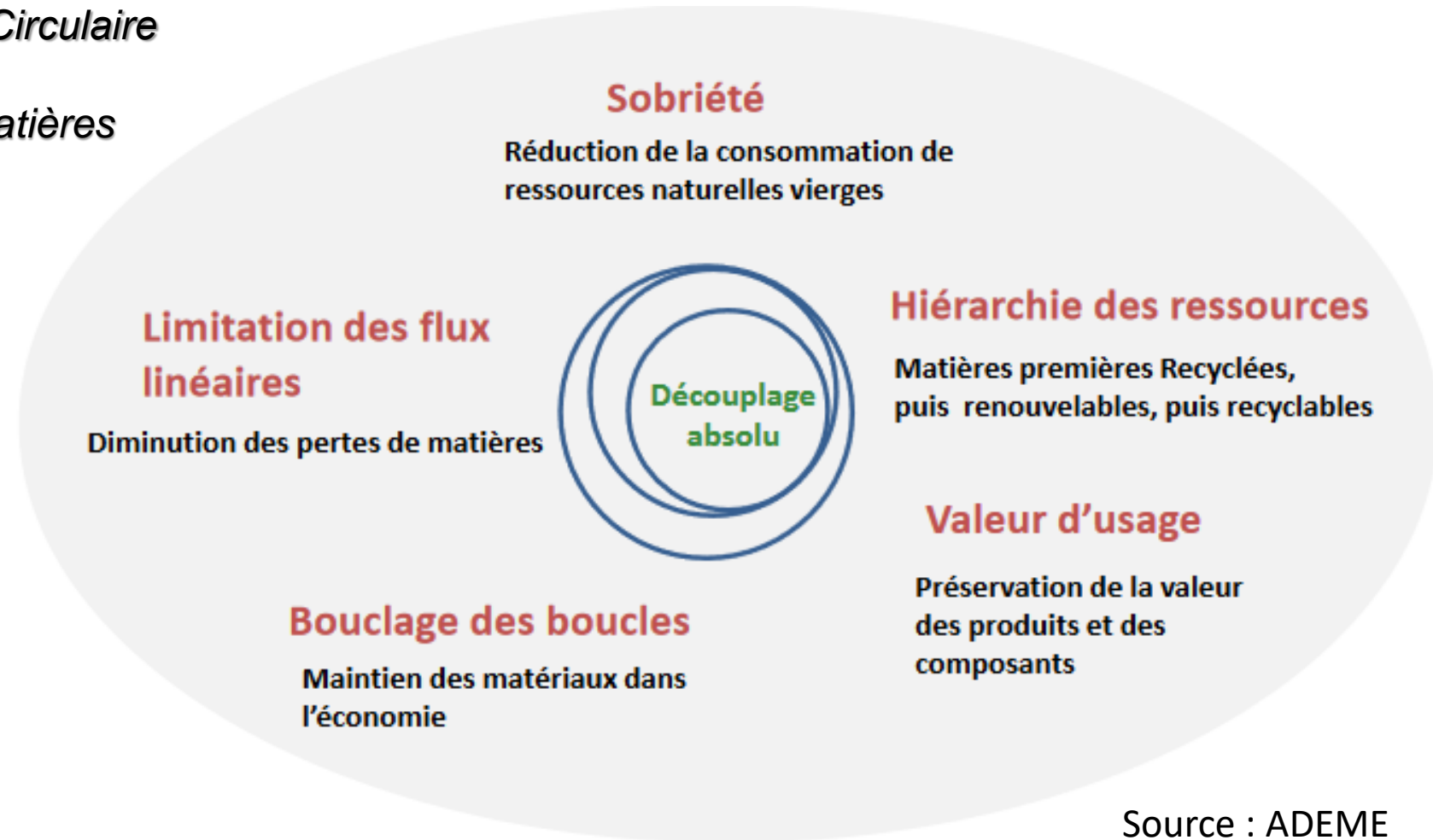
Action	Description
Refuser	Rendre les solutions superflues en abandonnant leur fonction ou en offrant la même fonction avec une solution radicalement différente.
Repenser	Reconsidérer la conception et les décisions de fabrication. Utiliser un service de manière plus intensive (par exemple, par le partage ou la mise sur le marché de produits multifonctions).
Approvisionnement circulaire	Sélectionner des ressources valorisées ou renouvelables, provenant ou produites à partir de sources durables. Utiliser des ressources qui peuvent être facilement recyclées ou qui peuvent facilement retourner dans la biosphère. Reconsidérer les formulations.
Réduire	Accroître l'efficacité de la fabrication ou de l'utilisation des produits en consommant moins de ressources naturelles et de matériaux.
Réparer	Restaurer un produit défectueux ou endommagé afin qu'il puisse être utilisé pour sa fonction d'origine.
Réutiliser	Réutiliser un produit mis au rebut qui est toujours en état de marche et qui remplit sa fonction d'origine.
Remettre en état	Remettre dans un état utile pendant la durée de vie prévue, avec des caractéristiques de qualité et de performance similaires.
Refabriquer	Remettre, à l'aide d'un processus industriel, un élément dans un état comme neuf dans une perspective de qualité et de performance.
Changer d'usage	Adapter un produit ou ses pièces pour une utilisation dans une fonction différente de celle prévue à l'origine, sans apporter de modifications majeures à sa structure physique ou chimique.
Utiliser en cascade	Transférer les matériaux valorisés d'une boucle à une autre pour optimiser les flux de produits de base par des cycles supplémentaires, souvent avec une baisse de la qualité et de la quantité. Lors de l'adoption d'un matériau biosourcé, l'utilisation en cascade implique l'utilisation répétée de ressources renouvelables à une qualité décroissante, avec des traitements finaux tels que le compostage, la valorisation énergétique ou la biodégradation et le retour sans danger du matériau dans l'environnement.
Recycler	Valoriser et traiter des matériaux pour obtenir la même qualité (haute qualité) ou une qualité inférieure (faible qualité) par des activités telles que la valorisation, la collecte, le transport, le tri, le nettoyage et le retraitement.
Valoriser l'énergie	Générer de l'énergie utile à partir des ressources valorisées.
Extraire les matières et matériaux mis en décharge	L'exploitation ou l'extraction depuis des décharges et installations de traitement des déchets peuvent être possibles dans certains cas si les activités d'exploitation ou d'extraction sont gérées de manière durable.

# CIRCULARITE & MATERIAUX

## Economie 'linéaire' vs. économie 'circulaire'

*Leviers d'actions de l'Economie Circulaire*

*peuvent être déclinés pour les matières  
mais avant cela  
aux produits/dispositifs/objets*



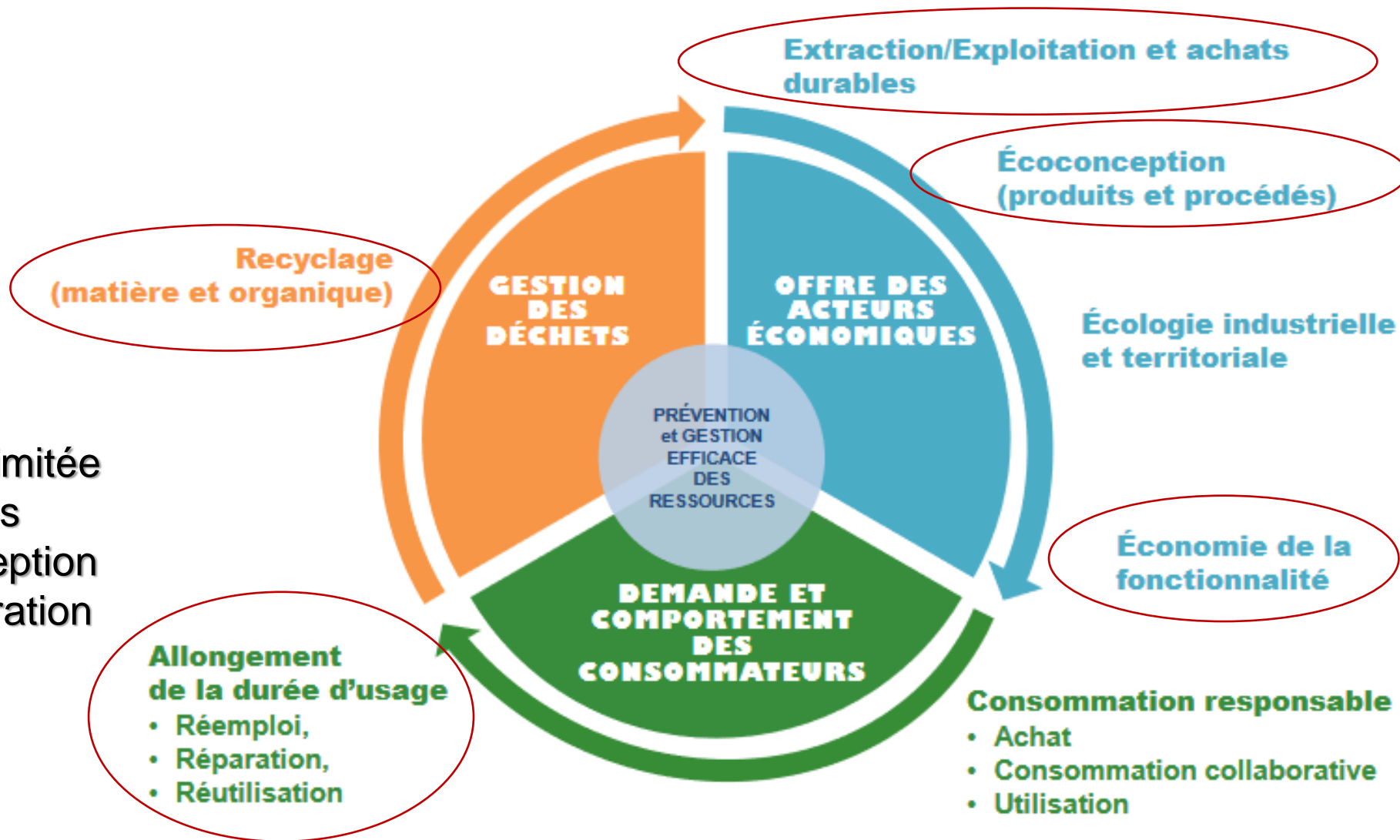
# CIRCULARITE & MATERIAUX

## Economie 'linéaire' vs. économie 'circulaire'

### Contributions 'matériau' à l'économie circulaire

### Matériaux 'responsables' contribuent via:

- Sources à empreinte limitée et/ou renouvelables
- Recyclabilité via conception matière et/ou intégration dans produits (permettant éco-conception)
- Réparabilité

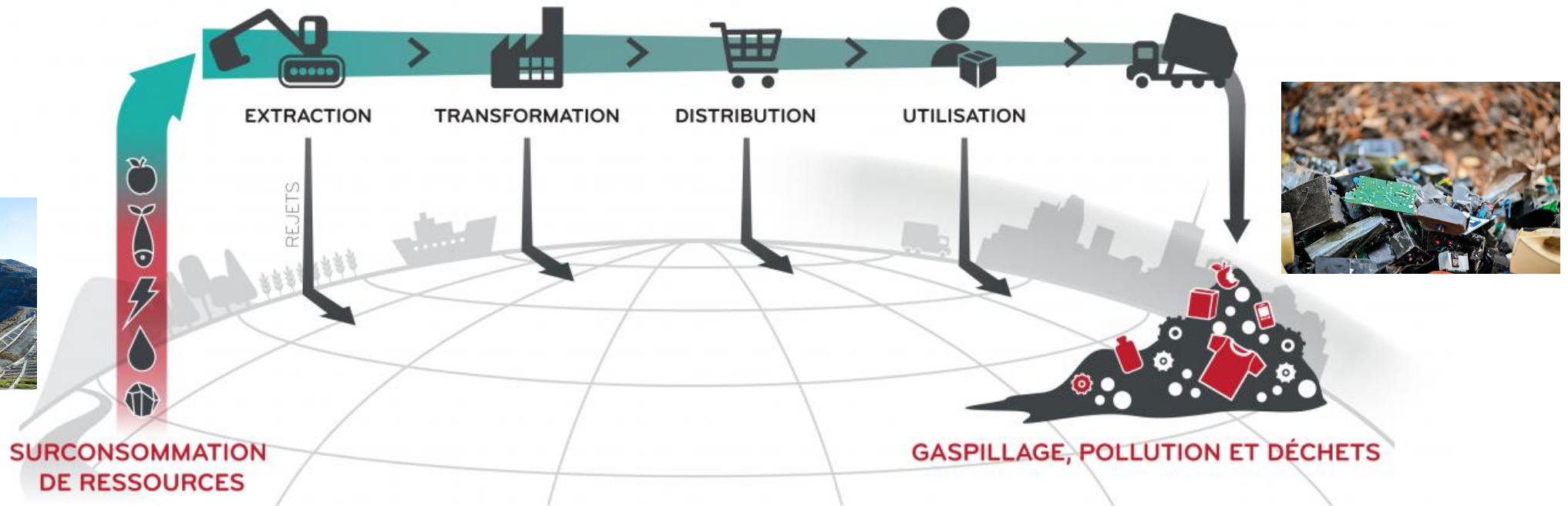


# CIRCULARITE & MATERIAUX

## Economie 'linéaire' vs. économie 'circulaire'

Déclinaison pour les métaux stratégiques

ÉCONOMIE  
LINÉAIRE



**INSA** INSTITUT NATIONAL  
DES SCIENCES  
APPLIQUÉES  
LYON

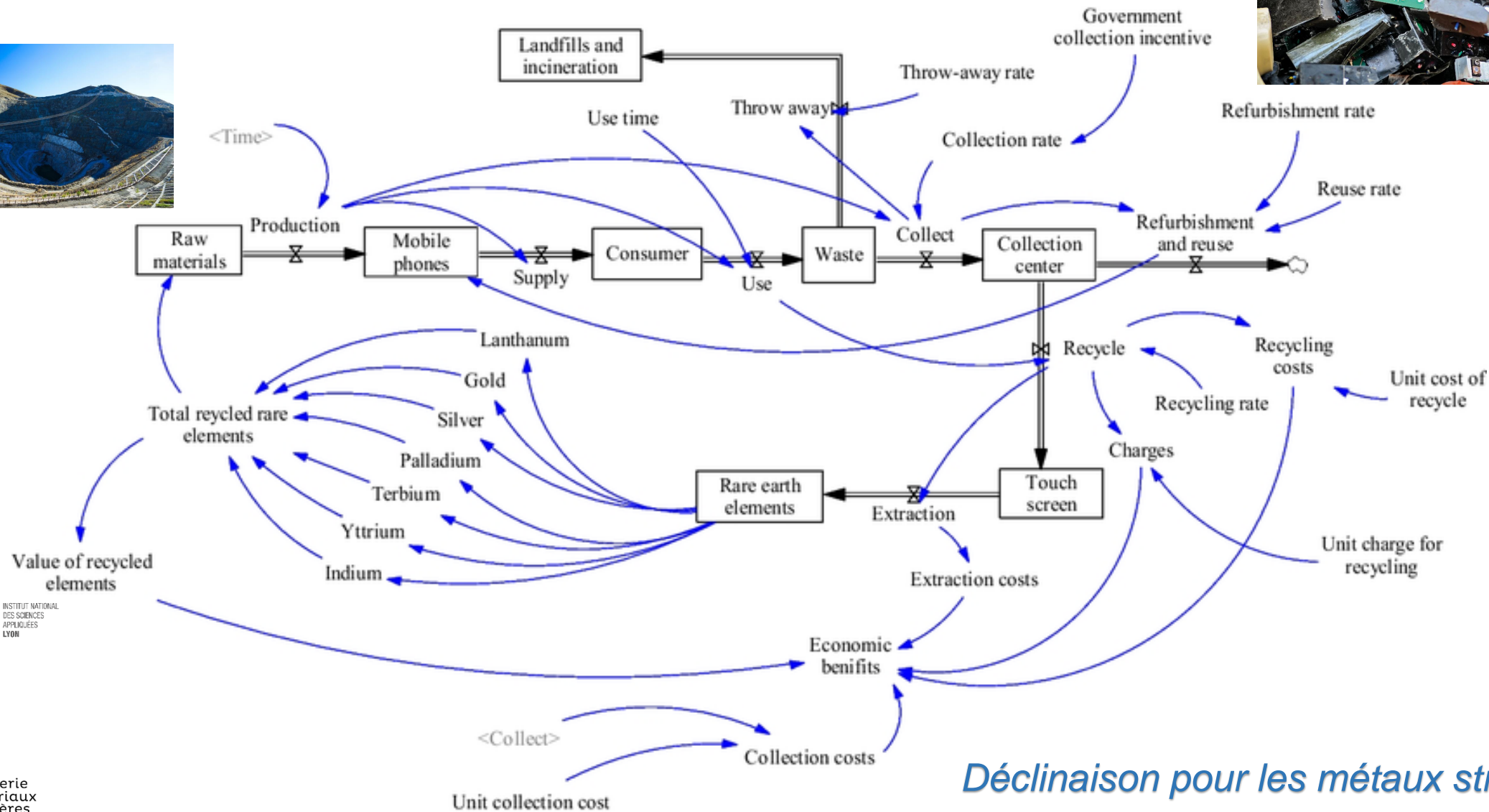


Ingénierie  
Matériaux  
Polymères

© Institut EDDEC, 2018. En collaboration avec RECYC-QUÉBEC. Reproduction autorisée. Modification interdite.

# CIRCULARITE & MATERIAUX

## Economie 'linéaire' vs. économie 'circulaire'



# ECONOMIE CIRCULAIRE & MATERIAUX

## Principe 1

Préserver et restaurer le capital naturel en contrôlant les stocks de ressources limitées et en équilibrant

Leviers ReSOLVE : Régénérer, Dématérialiser, Echanger



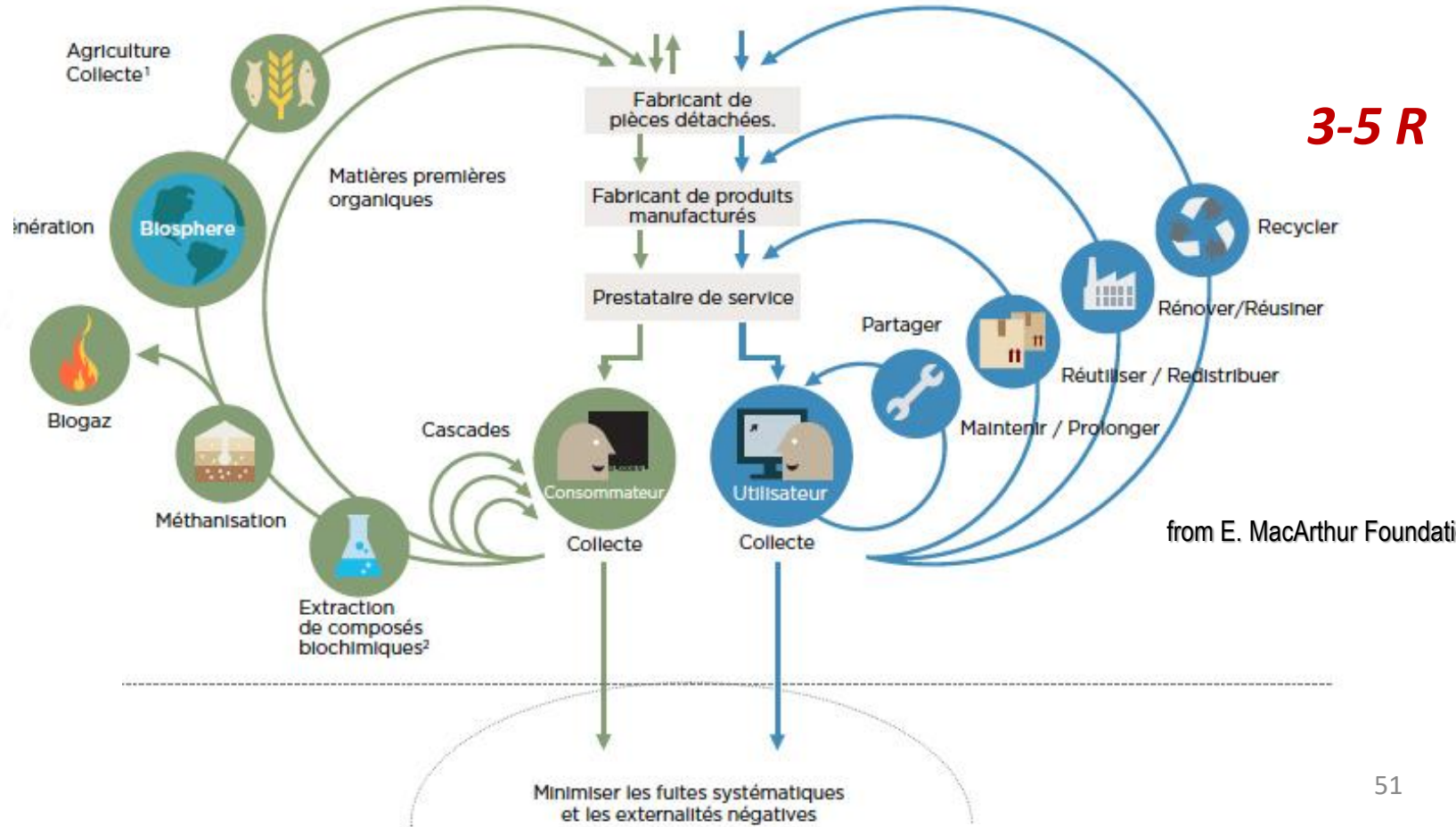
Gestion des flux renouvelables

Gestion des stocks

## Principe 2

Optimiser le rendement des ressources en favorisant la circulation des produits, des composants et des matériaux à leur niveau de fonctionnalité maximal à tout moment au cours des cycles techniques et biologiques

Lever ReSOLVE : Régénérer, Partager, Optimiser, Cycler



## Principe 3

Favoriser l'efficacité du système en décelant et en éliminant les externalités négatives

Tous les leviers ReSOLVE

# ECONOMIE CIRCULAIRE & MATERIAUX

## Contribution à l'économie circulaire/Matériaux responsables / 3-5...

9R

### RECYCLAGE

#### *Pouvoir être ré-utilisé*

- . sous sa forme initiale
- . sous d'autres formes pour d'autres usages (avec l'empreinte la plus faible)

**Chacune des solutions doit être évaluée:  
Analyse de Cycle de Vie  
ACV**

#### *Etre capable de s'auto-réparer*

- . pouvoir se réparer sous un stimulus externe
- . savoir s'auto-réparer

#### *Reconcevoir des matériaux*

- . à base de ressources renouvelables
- . intégrant les étapes de fin de vie
- . Intégrant leur analyse du cycle de vie

#### *Repenser leurs procédés de formulation et mise en forme*

- . économes en énergie et matières (sans solvants)
- . assemblage
- . permettant agilité/personnalisation



#### *Répondre spécifiquement à un usage*

- . intégrer une multifonctionnalité
- . répondre à des stimuli externes

# NECESSITE D'UNE APPROCHE SYSTEMIQUE DU RECYCLAGE

- *Focalisation des moyens sur certains matériaux ou filières*
- *Contrôle de l'amont des CGV*
- *Sécurité des sources d'approvisionnement en déchets*

- *Législation d'encadrement du recyclage*
- *Verrous et enjeux des politiques publiques*
- *Pertinence économique du recyclage pour les déchets différents*

Sécurisation des filières de recyclage, approvisionnement

Stratégies et politiques nationales, EU

**Questions multiples posées par le recyclage**

Résoudre un problème technique

Mesurer, quantifier le recyclage

Modèles Société au regard des ressources

- *Démantèlement des objets pour accéder aux matériaux*
- *Identifier les matériaux dans les gisements de déchets*
- *Séparer et extraire les matériaux*

- *Indicateurs de performances du recyclage*
- *Recyclage et ACV*
- *Taux de recyclage globaux*

- *Pratiques de gestion et de collecte des produits en fin de vie*
- *Recyclage et croissance économique*
- *Récit sur consommation des ressources*

# NECESSITE D'UNE APPROCHE SYSTEMIQUE DU RECYCLAGE

*Géopolitique,  
Géoéconomie*

Sécurisation des filières de recyclage, approvisionnement

**Sciences nécessaires (pluri-, trans- et inter-disciplinarité)**

*Chimie, Physique, Ingénierie, Numérique, Toxicologie, ...*

Résoudre un problème technique

Mesurer, quantifier le recyclage

*Macroéconomie, ACV, MFA (Material Flow Analysis)*

*Droit, Management, Politique Publique*

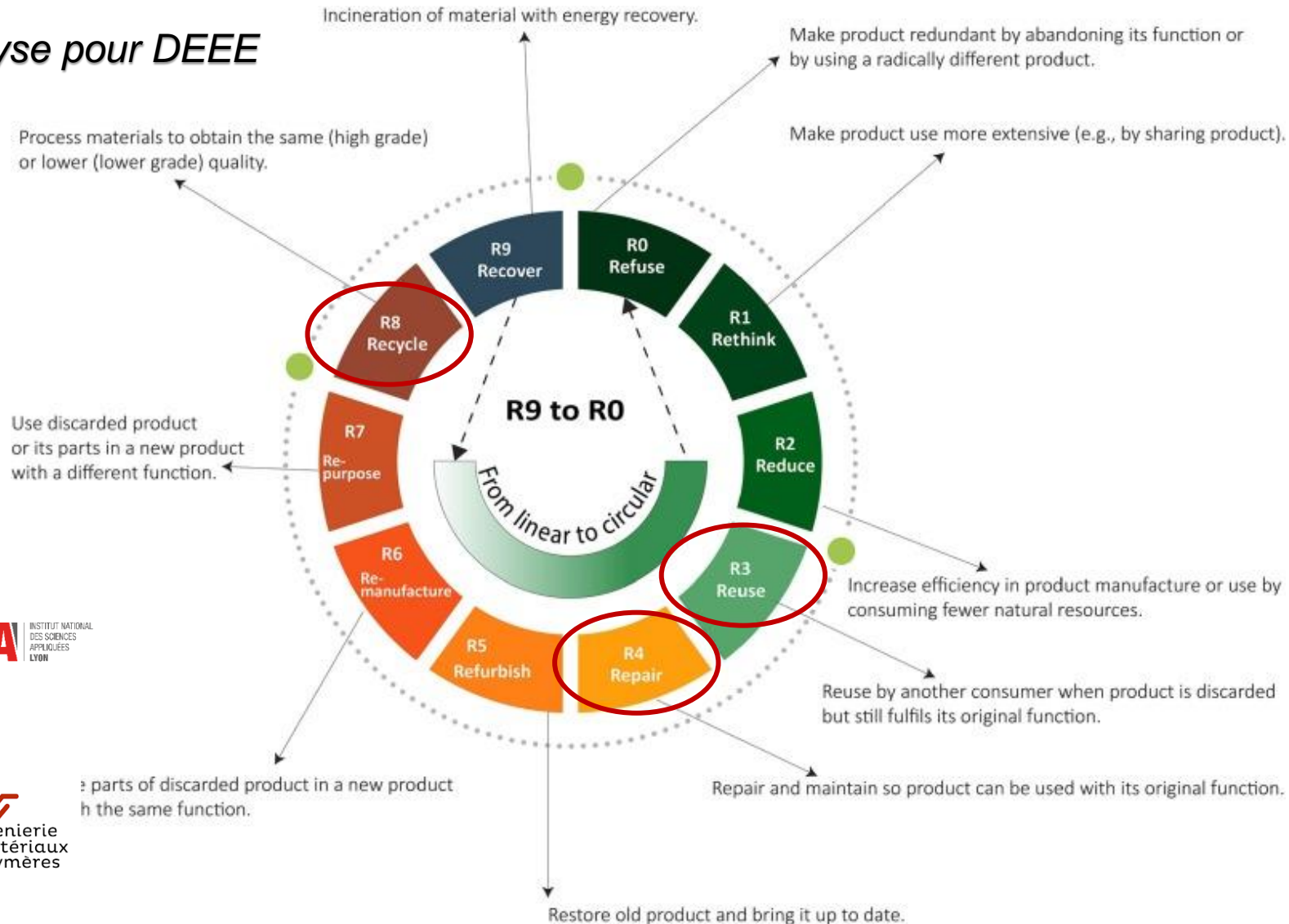
Stratégies et politiques nationales, EU

Modèles Société au regard des ressources

*Sciences Politiques, Economie, Sociologie, Philosophie*

# NECESSITE D'UNE APPROCHE SYSTEMIQUE DU RECYCLAGE

## Analyse pour DEEE



INSA INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES LYON

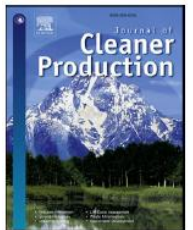
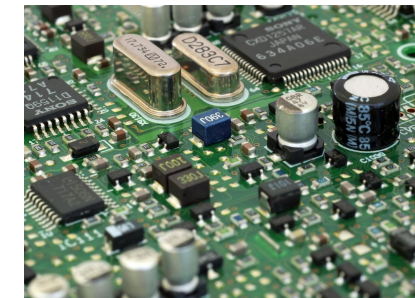


Ingénierie Matériaux Polymères

Analyse de la littérature scientifique montre que les problématiques de l'Economie Circulaire sont traitées essentiellement à travers:

- Recyclage
- Stratégies de transformation circulaire vs linéaire

Les stratégies d'actions concrètes auprès des consommateurs même si consommateur conscient des enjeux de l'EC



Review

Circular value chain blind spot – A scoping review of the 9R framework in consumption

Tom Hunger, Marlen Arnold, Martin Ulber

Corporate Environmental Management and Sustainability, Faculty of Economics and Business Administration, University of Technology Chemnitz, Thüringer Weg 7, 09126 Chemnitz, Germany

# Voilà pourquoi le PEPR Recyclage est là! Un réseau de recherche coordonné mobilisé pour une approche systémique du recyclage des matériaux



- Plus de 100 laboratoires ESR mobilisés (300-400 chercheurs) dans le cadre des (11) axes du programme
- Mobilisation de l'ensemble de la communauté scientifique (laboratoires impliqués + autres) et une déclinaison territoriale dans le cadre des 21 Lieux-totem et leurs activités

- 1.- INTRODUCTION GENERALE – CONTEXTE GENERAL  
ENJEUX DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE (DES MATIERES)
- 2.- MATERIAUX DU NUMERIQUE ET RECYCLAGE
- 3.- ECONOMIE CIRCULAIRE DES MATIERES  
**REQUIS ET FREINS A LA CIRCULARITE**
- 4.- AUTRES MODELES: L'ECONOMIE DE LA FONCTIONNALITE

# LES FREINS À LA CIRCULARITÉ DES MATIÈRES / PRODUITS



- **Limitations 'matière'** : réalité des matières y compris leur évolution au cours du temps,, difficultés recyclages potentiels pour répondre à cahier des charges réutilisation, NIAS (Non-Intentionally Added Substances) à l'issue du processus de recyclage
- **Limitations liées au démantèlement/à la conception** des dispositifs / objets
- **Limitation liées aux gisements** : collecte, volumes, régularité, concentration
- **Limitations économiques et géo-politiques**: coûts (logistique de la collecte, coûts des traitements, 'coût de la pureté', etc), justification économique circularité (vis-à-vis énergie, cours des matières, marché des matières recyclées), compétition entre solutions de circularité, politiques (stratégies nationales et internationales)
- **Limitations culturelles / sociétales**: politiques de marketing, appropriation des gestes et comportements liés au recyclage et recyclabilité, acceptation/bilité des réglementations

# LIMITATIONS À LA CIRCULARITÉ LIÉES AUX 'MATIÈRES'



Familles 'génériques' de matériaux: en réalité multiplicité de grades, formulations, alliages, ...

Grades	Melt Flow	Density	Features	Typical Application
<b>PP Homo</b>				
	(2.16, g/10min)	(g/cm3)		
PHT 0171	1.7	900	Thermoforming - Nucleated grade, Good processability	Food packaging tray and containers, Drinking cup, Dunnage trays, Rigid sheets
PHY 0351	3.5	900	Raffia & Yarn - For machine speed up to 350m/min, Excellent tenacity	Flat yarn for woven application such as Sacks, Tarpaulins, Twines, Ropes
PHY 0401	4	900	Raffia & Yarn - For machine speed up to 500m/min, Excellent tenacity	Flat yarn for woven application such as Sacks, Tarpaulins, Twines, Ropes
PHF 0301	3	900	BOPP - High clarity, Good mechanical properties	BOPP for Food and Snack packaging, Adhesive tape, Cigarette packaging
PHF 0701	7	900	CPP - Formulated with slip agent, High clarity, Good mechanical properties	Non-metallized CPP film for Food and Snack packaging, Flexible packaging
PHF 0702	7	900	IPP - High slip and anti block, Excellent clarity, Excellent openability	Thin IPP film up to 30 micron for Food and General packaging
PHF 0703	7	900	CPP - Metallized barefoot grade, High clarity, Good mechanical properties	Metallized CPP film for Food and Snack packaging, Flexible packaging
PHF 1001	10	900	IPP - Medium slip and anti block, Good clarity, Good openability	IPP film for Food and Garment packaging
PHJ 1201	12	900	Injection - Nucleated grade, Outstanding processability, High stiffness	Furniture, Housewares, General purpose containers, Rigid packaging
PHJ 1202	12	900	Injection - Good mechanical properties, Good processability	Caps and closures, Houseware, Toys, General purpose containers, Rigid packaging
PHJ 4501	45	900	TWIM - Nucleated grade, Excellent processability, Good stiffness-impact balance	Reusable food containers, Popcorn tubs, Tumblers and drinking cups, CD/DVD cases
PHJ 6001	60	900	TWIM - Nucleated grade, Superior processability, Good stiffness-impact balance	Reusable food containers, Popcorn tubs, Tumblers, Take out tray
<b>PP Random</b>				
	(2.16, g/10min)	(g/cm3)		
PRB 0202	2	900	High clarity and gloss, Formulated with anti-stat	Hot fill packaging, bottle for personal care and cosmetics, high caps and closures, Transparent containers and houseware, ISBM bottles
PRJ 1102	11	900	High clarity and gloss, Excellent processability, Formulated with anti-stat	Transparent small containers via multi cavity, Large storage containers, Tote Boxes
PRJ 3501	35	900		

Grades	Melt Flow	Density	Features	Typical Application
<b>HDPE</b>				
	(2.16, g/10min)	(g/cm3)		
HF 09522	0.075	952	HMW film grade, High tensile strength; High stiffness; Good puncture resistance	Grocery bags, Supermarket produce bags, Carrier bag, Trash bag, Sack liners
HF 14522	0.12	952	MMW film grade, High stiffness, Good puncture resistance	Roll bags, Wet market bag, Sando bag, Laundry bag, Trash bag, Carrier bag, Flexible packaging
UHF 1050A*	0.085	950	HMW film grade, Good puncture resistance, Superior toughness, Good stiffness	Grocery bags, Supermarket produce bags, Carrier bag, Trash bag, Sack liners
UHF 1446A*	0.19	946	MMW film grade, Good puncture resistance, Good toughness and processability	Roll bags, Wet market bag, Sando bag, Laundry bag, Trash bag, Carrier bag, Flexible packaging
BF 09491*	0.07	949	Bimodal film grade, Excellent tensile load bearing capacity, Good stiffness	Grocery bags, Roll bags, Supermarket produce bag, Carrier bag, Trash bag, Sack liner
BHF 0850A*	0.06	950	Bimodal film grade, Excellent tensile load bearing capacity, Good stiffness	General purpose films like Wet market bag, Carrier bag, Trash bag, Grocery bag
HJ 04551*	4	955	UV stabilised, Outstanding impact strength	Injection molded Pallets, Trays, Crates, Industrial part
HJ 04601	4	960	UV stabilised, Excellent impact strength, High stiffness	Injection molded Pallets, Trays, Crates, Industrial part
HJ 04602	4	960	Organoleptic certified	Injection and compression molded part, Beverage caps for mineral water, juice and tea
HJ 08601	8	960	Organoleptic certified, Good impact strength, UV stabilised	Injection molded Crate and Cases, Beverage caps for still and mineral water
UHJ 0860A*	8	960	Good impact strength, UV stabilised	Injection molded Crates, Cases, Tote boxes
HJ 20571	20	957	High flow, Excellent processability	Injection molded Housewares, Caps, Pails, Toys
HJ 20572*	20	957	Superior processability for high speed injection molding	Injection molded Housewares, Caps, Pails, Toys
AHJ 0252A	2	952	Excellent ESCR, Outstanding processability, Formulated with slip agent	Injection and compression molded Beverage caps for CSD, juice and tea drinks
AHJ 0252B	2	952	Excellent ESCR, Outstanding processability	Injection and compression molded Beverage caps for CSD, juice and tea drinks
HB 23551	0.27	955	Excellent top load strength, Good ESCR, Good impact resistance	Bottle for household and industrial chemical, Personal care, small blow molded bottle
HB 33531	0.39	953	Outstanding processability, Good ESCR, Good impact resistance	Bottle for household and industrial chemical, Personal care, small blow molded bottle
HB 3355A-5502*	0.35	955	Outstanding processability, Excellent top load strength, Good impact resistance	Bottle for household and industrial chemical, Personal care, small blow molded bottle
HB 09521	0.075	952	Outstanding ESCR (>700 Hrs), High stiffness, Allow downgauging with regrind	Medium size containers and jerrycan (up to 50 liters) for cooking oil, chemicals, household
HB 1048A*	0.085	948	High ESCR; High impact strength	Medium size containers and jerrycan (up to 50 liters) for cooking oil, chemicals, household
10561	1	956	Excellent tenacity, High stretchability	Commercial and industrial Nets and Ropes, Non-woven filament applications
UHM 0856A*	0.8	956	Very good processability, Excellent balance tenacity and stretchability	Commercial and industrial Nets and Ropes, Non-woven filament applications
HP 10441	0.08	944	PE-80 certified, High Oxidation Induction Time (OIT), Good stiffness	Pressure Pipe for building/construction, Corrugated pipe for electrical conduits, irrigation etc.
HP 06491	0.02	949	PE-100 certified, Excellent sag resistance, High OIT, Good slow crack resistance	Pressure pipe for small to large diameter for water, irrigation, industrial, mining etc.
BHP 0348A*	<math>\leq 0.3</math>	948	PE-100 RC, Excellent rapid crack propagation resistance, High OIT	Pressure pipe for non conventional (e.g trenchless) and conventional installation techniques
BHP 0747A*	<math>\leq 0.7</math>	947	PE-100 RT Type II, Excellent long term stability at elevated service temperature	Hot and cold water supply, Underfloor heating, Radiator connections, Multilayer composite pipe

\*New Evalene and Evalene Plus grade

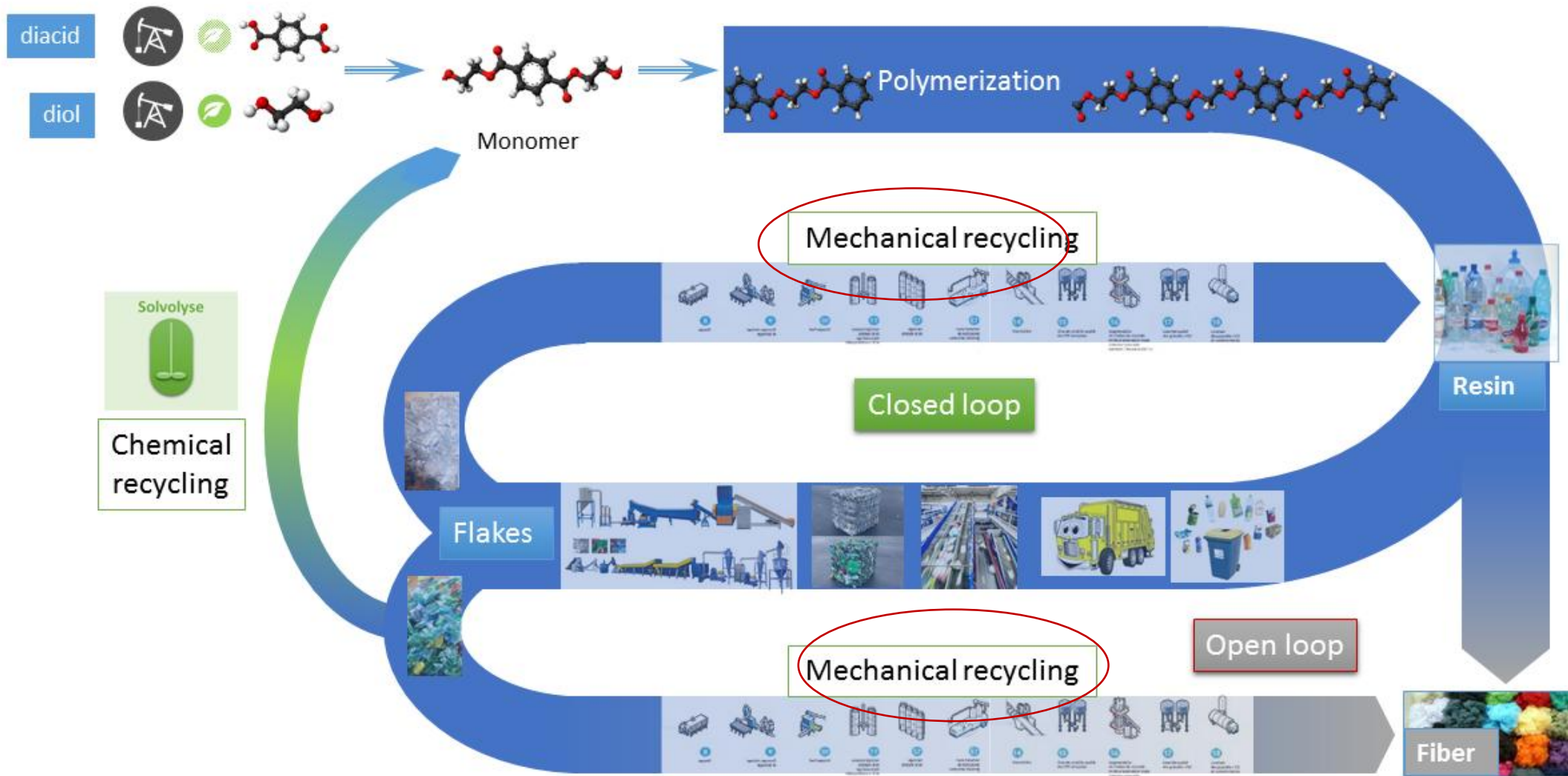


<https://www.polyedge.com>



# LIMITATIONS À LA CIRCULARITÉ LIÉES AUX 'MATIÈRES'

## Recyclage mécanique du polyéthylène téréphtalate (PET)





# LIMITATIONS À LA CIRCULARITÉ LIÉES AUX 'MATIÈRES'

Recyclage mécanique du polyéthylène téréphtalate (PET)

Collection of used bottles



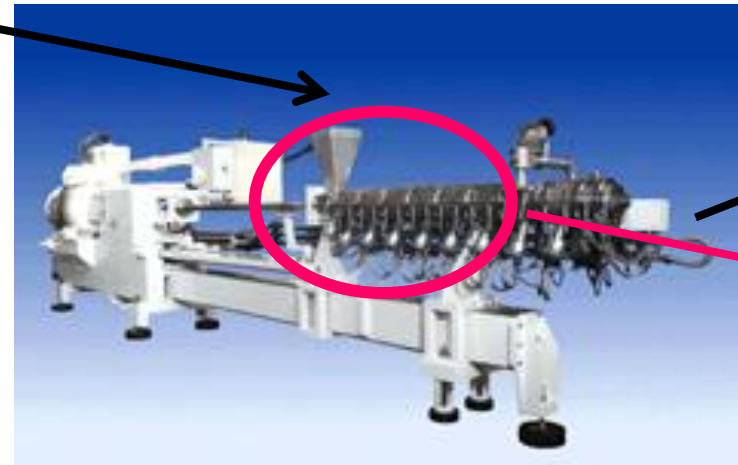
PET bottles



Blowing bottles  
'blow-molding'



Extrusion/ Filtration of melt



Drying pellets

SSP

Injection  
of pre-forms

Chemistry

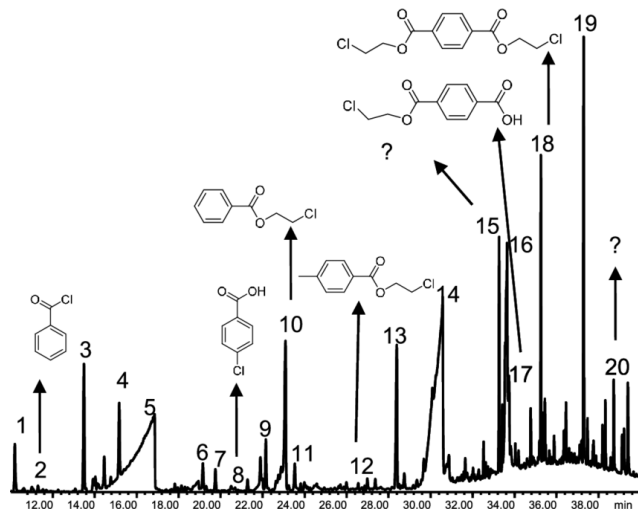




# LIMITATIONS À LA CIRCULARITÉ LIÉES AUX 'MATIÈRES'

Recyclage mécanique du polyéthylène téréphtalate (PET)

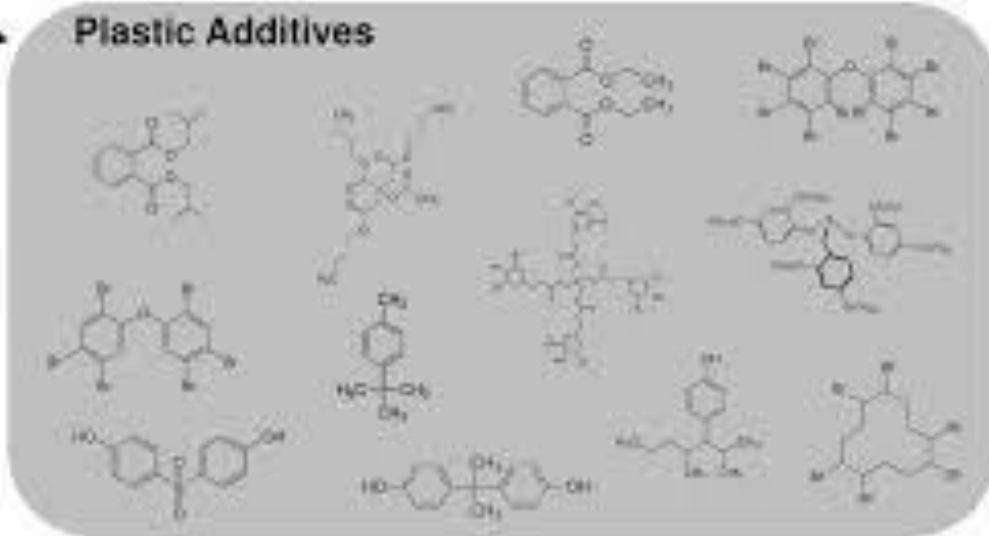
Recycled PET ... but presence of NIAS (Non-Intentionally Added Substances)



Py-GC/MS



Plastic Additives



Contaminants

Recycling processes

Oligomers

Reaction between monomers

Non-intentionally added substances  
NIAS

Impurities in the raw materials

Additives and polymers

By-products compounds

Interaction between ingredients and substances

Breakdown products

Degradation of additives and polymers

# LIMITATIONS À LA CIRCULARITÉ LIÉES AUX 'MATIÈRES'

*Tri / séparation / identification des matières*

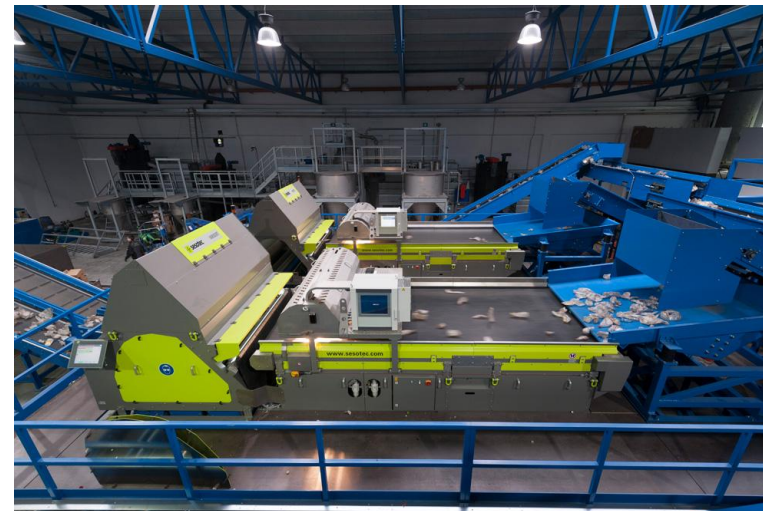
Exemple DEEE



Photo by Amelia Holowaty Krales / The Verge



Sesotec.com



Moyens analytiques nécessaires:

- . investissements,
- . compétences / formation,
- . versatilité avec variabilité

**INSA** INSTITUT NATIONAL  
DES SCIENCES  
APPLIQUÉES  
LYON

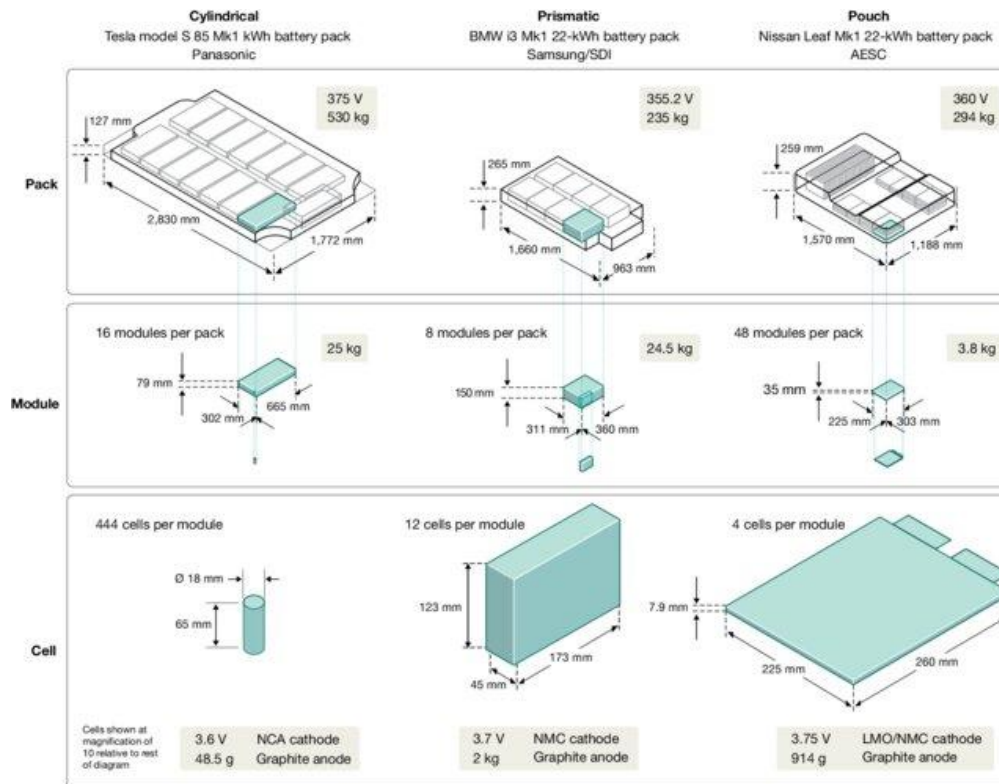


Ingénierie  
Matériaux  
Polymères

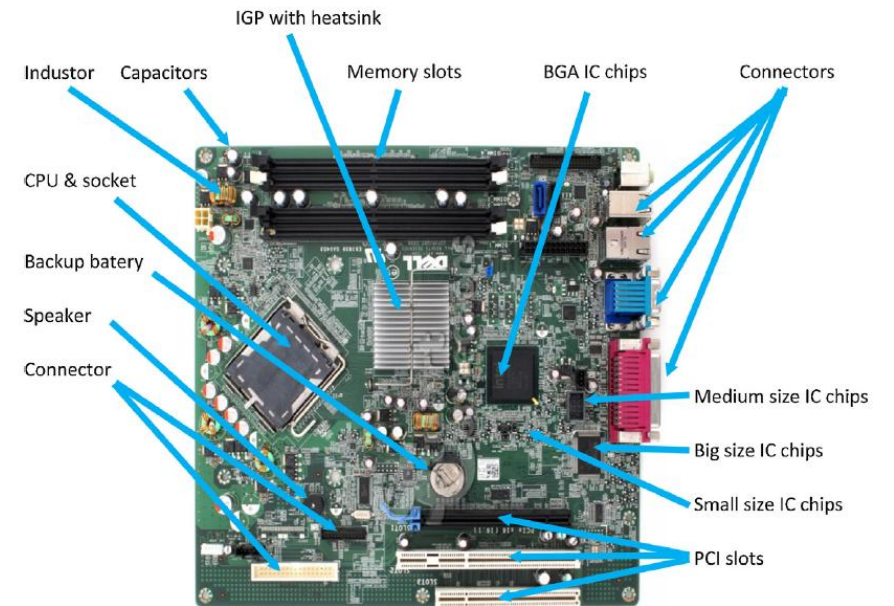
# LIMITATIONS LIÉES AU DÉMANTÈLEMENT/À LA CONCEPTION DES DISPOSITIFS / OBJETS

Les objets ne sont pas conçus pour un démantèlement 'matière'

## Batteries Li



## Carte mère



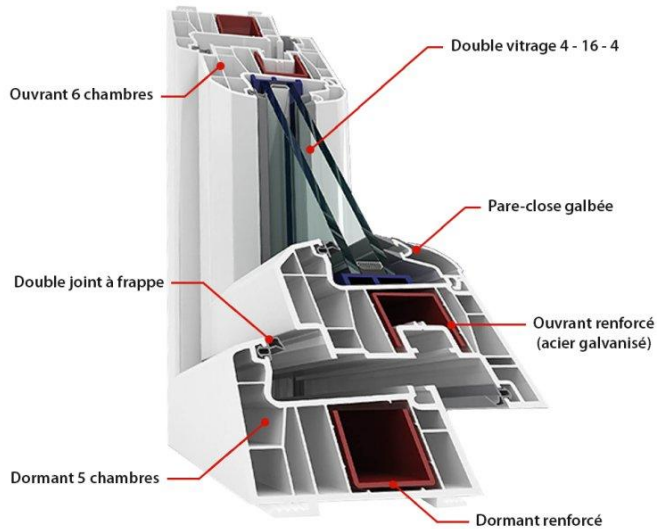
Metal contents (mg/Kg) in the PCBs of waste desktop computers.

Type of PCBs	Weight/ piece (g)	Ag (g/kg)	Au (g/kg)	Pd (g/kg)	Al (g/kg)	Cu (g/kg)	Fe (g/kg)	Ni (g/kg)	Zn (g/kg)	Nd (g/kg)	Sn (g/kg)	Sb (g/kg)	Pb (g/kg)
PCBs of HDD drive (Kida, 2010)	84	0.087	0.013	0.014	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Memory modules (Li and Xu, 2015)	20	0.79	823	0.05	-	132	-	-	-	-	-	-	-
PCI cards (Kida, 2010)	62	0.073	0.015	0.01	7.1	20.4	3.8	0.14	0.1	0.01	1.5	0	1.05
PCBs of LCD monitors	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Motherboards (Kida, 2010)	459	0.35	0.067	0.089	58	77.1	3.99	1.21	0.1	0.06	14	0.02	8.89
Power boards (JX, 2010)	2000	0.68	-	-	26	120	61	6.4	10	-	22	1.4	11

# LIMITATIONS LIÉES AU DÉMANTÈLEMENT/À LA CONCEPTION DES DISPOSITIFS / OBJETS

Les objets ne sont pas conçus pour un démantèlement 'matière'

## Menuiseries à base PVC



Produits multi-matériaux



Séparation des matières  
*Organisation collective*  
*(territoires, coûts)*



Recyclage de la matière (PVC)  
*Présence polluants*  
*(Pb et amiante par ex)*



Sources: <https://www.verre-menuiserie.com> / <https://www.recita.org/>

# LIMITATIONS LIÉES AUX GISEMENTS

Nécessité de constituer des gisements

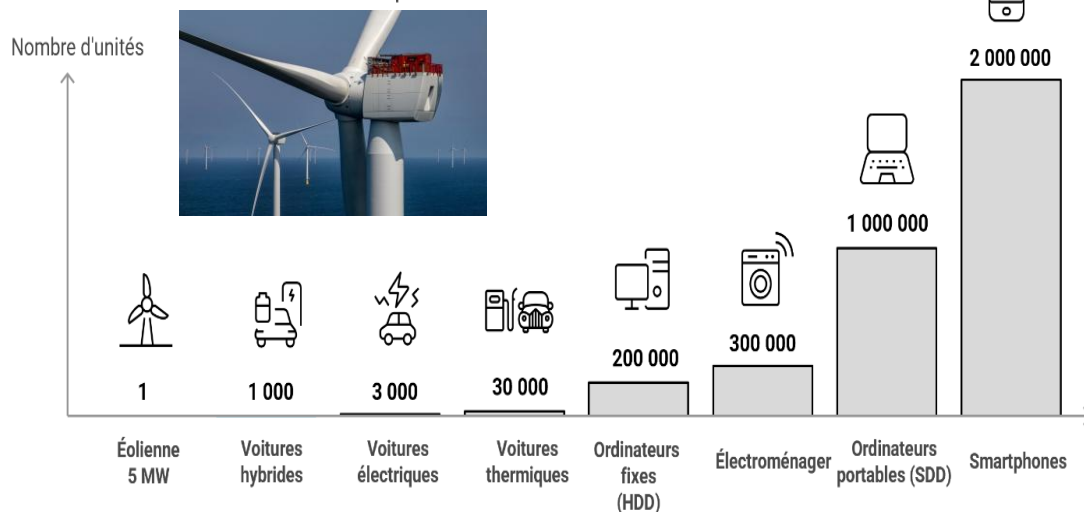
- importants en volume
- constants
- garantis

pour mettre en place une filière

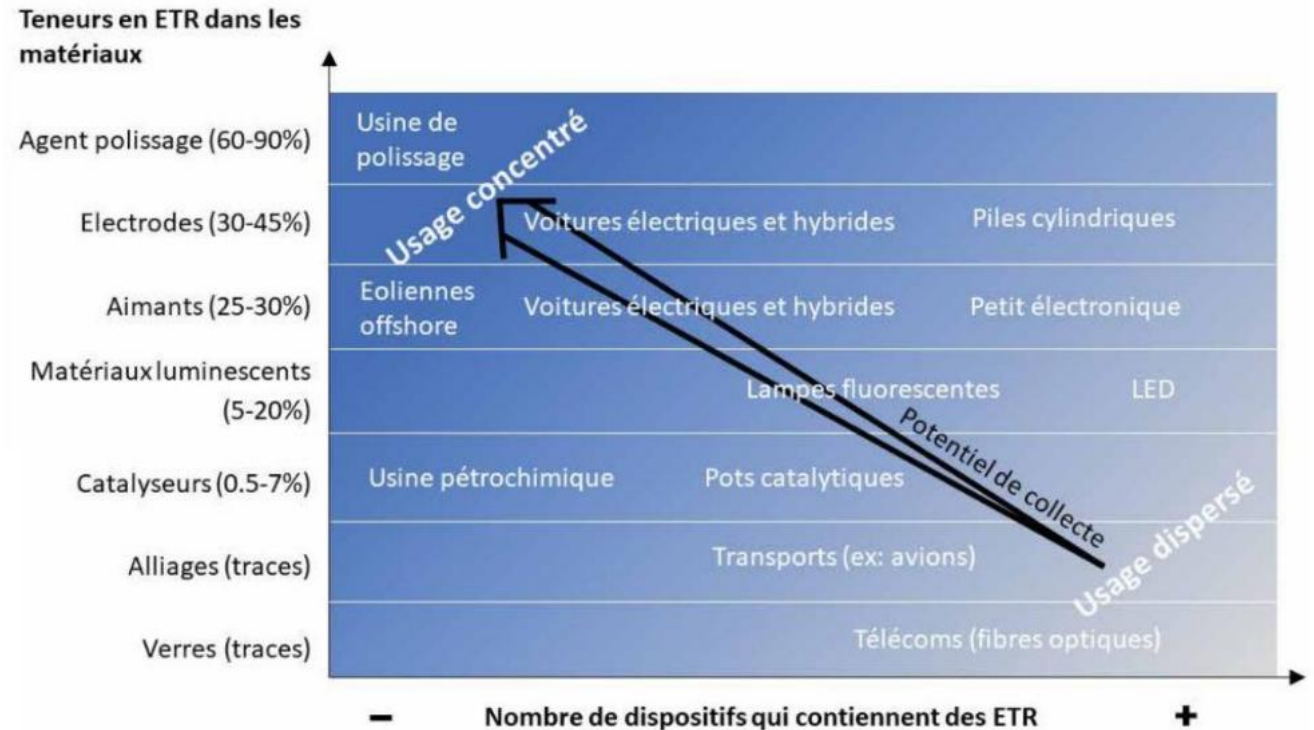
## Collecte:

- Système, territoire(s)
- Analyse économique

Nombre d'objets à traiter pour obtenir la même quantité de NdFeB que dans un aimant d'éolienne 5 MW



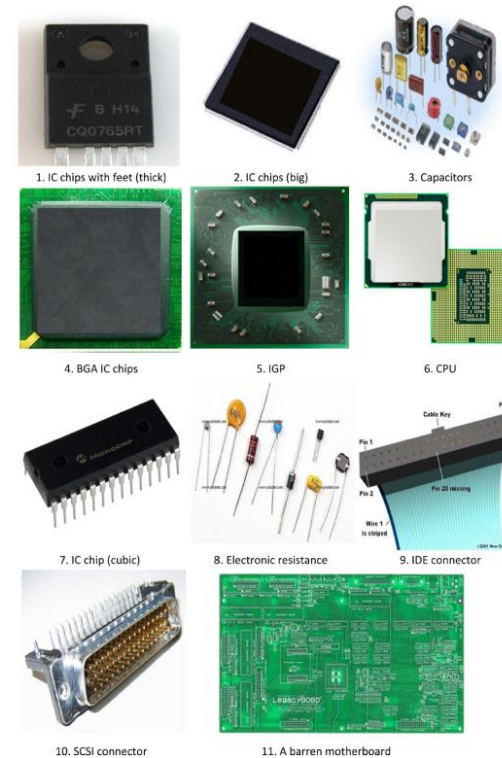
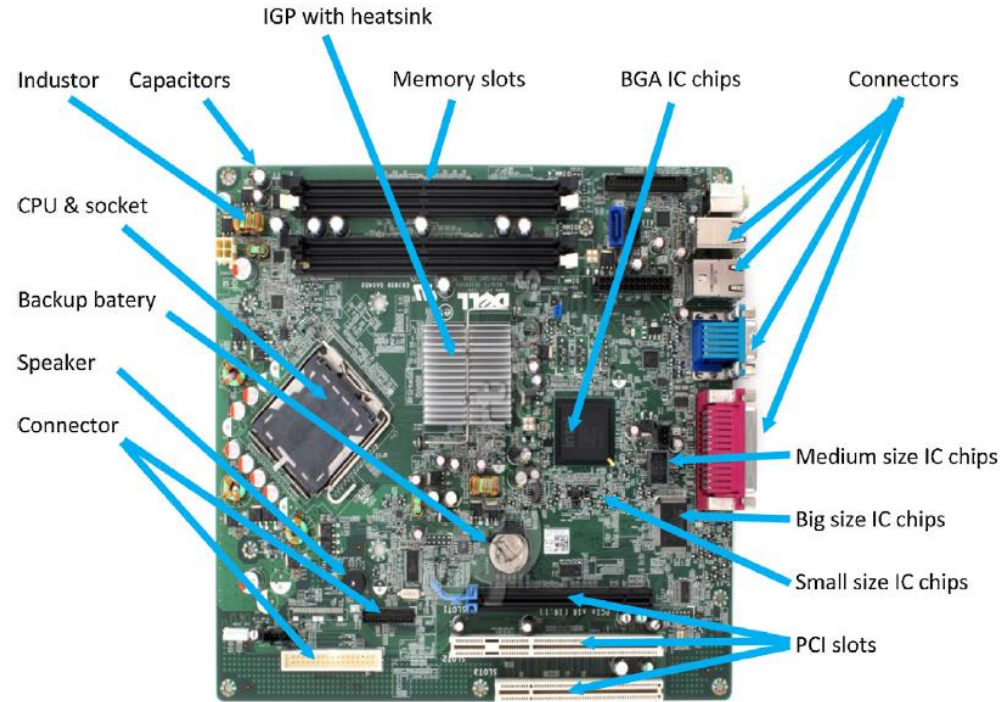
Potentiel de collecte des ETR en vue de leur recyclage



Expertise collective ETR CNRS (2025)

# LIMITATIONS LIÉES AUX GISEMENTS

## Matières à recyclées dispersées dans les gisements



K.M.H. Al Razi et al, Res.,  
Conserv. & Recycling, 110,  
(2016) 30-47

Metal contents (mg/Kg) in the PCBs of waste desktop computers.

Type of PCBs	Weight/ piece (g)	Ag (g/kg)	Au (g/kg)	Pd (g/kg)	Al (g/kg)	Cu (g/kg)	Fe (g/kg)	Ni (g/kg)	Zn (g/kg)	Nd (g/kg)	Sn (g/kg)	Sb (g/kg)	Pb (g/kg)
PCBs of HDD drive (Kida, 2010)	84	0.087	0.013	0.014	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Memory modules(Li and Xu, 2015)	20	0.79	823	0.05	-	132	-	-	-	-	-	-	-
PCI cards (Kida, 2010)	62	0.073	0.015	0.01	7.1	20.4	3.8	0.14	0.1	0.01	1.5	0	1.05
PCBs of LCD monitors	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Motherboards (Kida, 2010)	459	0.35	0.067	0.089	58	77.1	3.99	1.21	0.1	0.06	14	0.02	8.89
Power boards (JX, 2010)	2000	0.68	-	-	26	120	61	6.4	10	-	22	1.4	11

# LIMITATIONS LIÉES AUX GISEMENTS

## Focalisation vers gisements 'concentrés' en matières à recycler

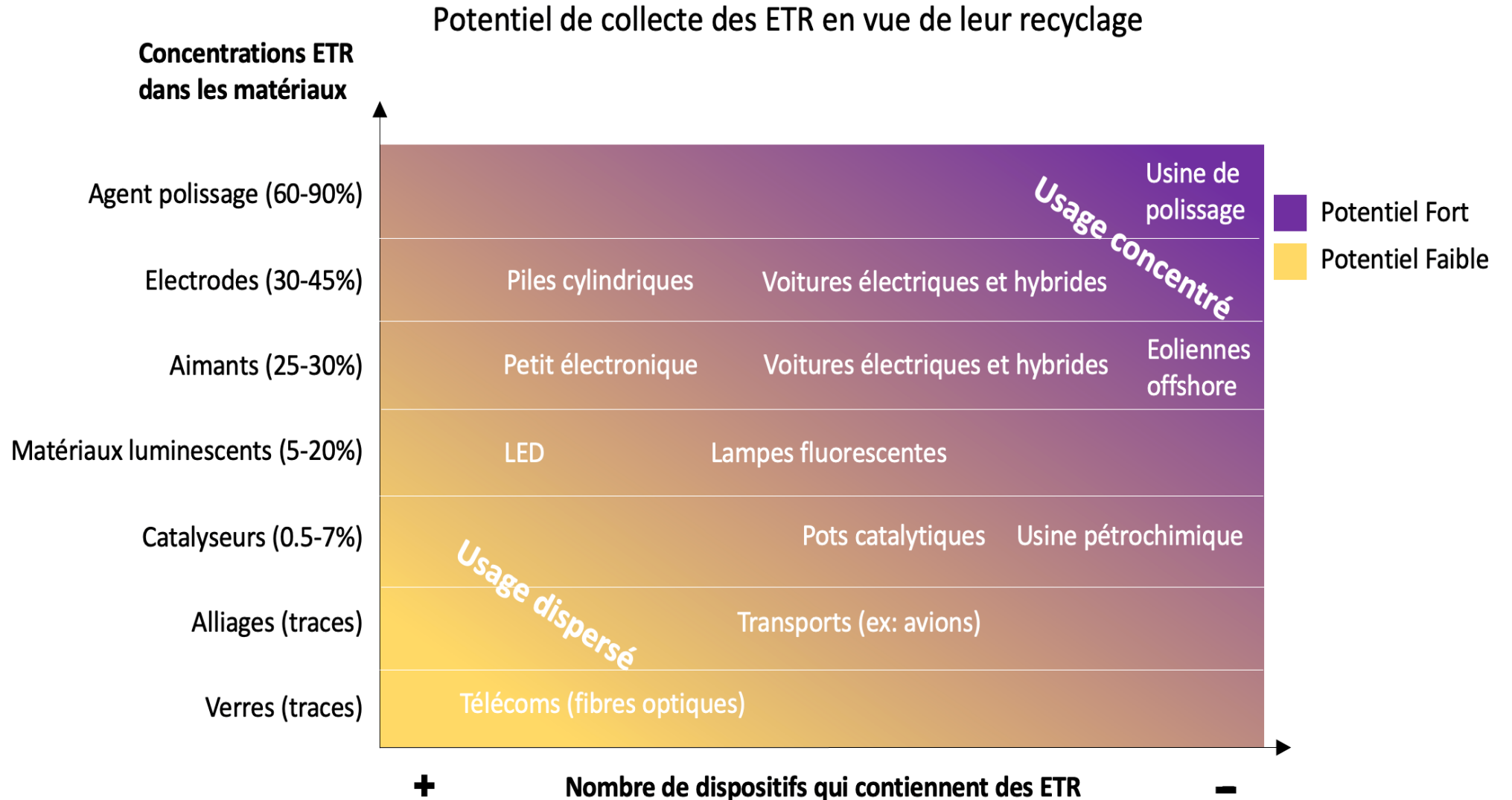
*Si la masse d'aimants générés en 2020 et similaire à celle des LED (170 000 t et 114 000 t), la forte concentration en ETR des aimants (26,6% face à 0.022% pour les LED) en fait une source d'ETR bien plus intéressante pour recyclage.*



Source des ETR	Métal cible	Coût des composés métalliques provenant de la production secondaire (€/kg)	Prix de l'oxyde métallique provenant de la production primaire (€/kg)
Processus poudre fluorescente	Y	0.04	2.9
	Eu	1.0	77.0
	Ce	0.03	2.1
	Gd	0.5	37.0
	La	0.03	2.1
	Tb	7.0	513.0
Processus catalyseurs FCC	La	14	2.1
	Ce	14	2.1
Processus d'aimants permanents	Nd	8.0	57.0
	Pr	11.0	74.0

# LIMITATIONS LIÉES AUX GISEMENTS

## Focalisation vers gisements 'concentrés' en matières à recycler



# LIMITATIONS LIÉES AUX GISEMENTS

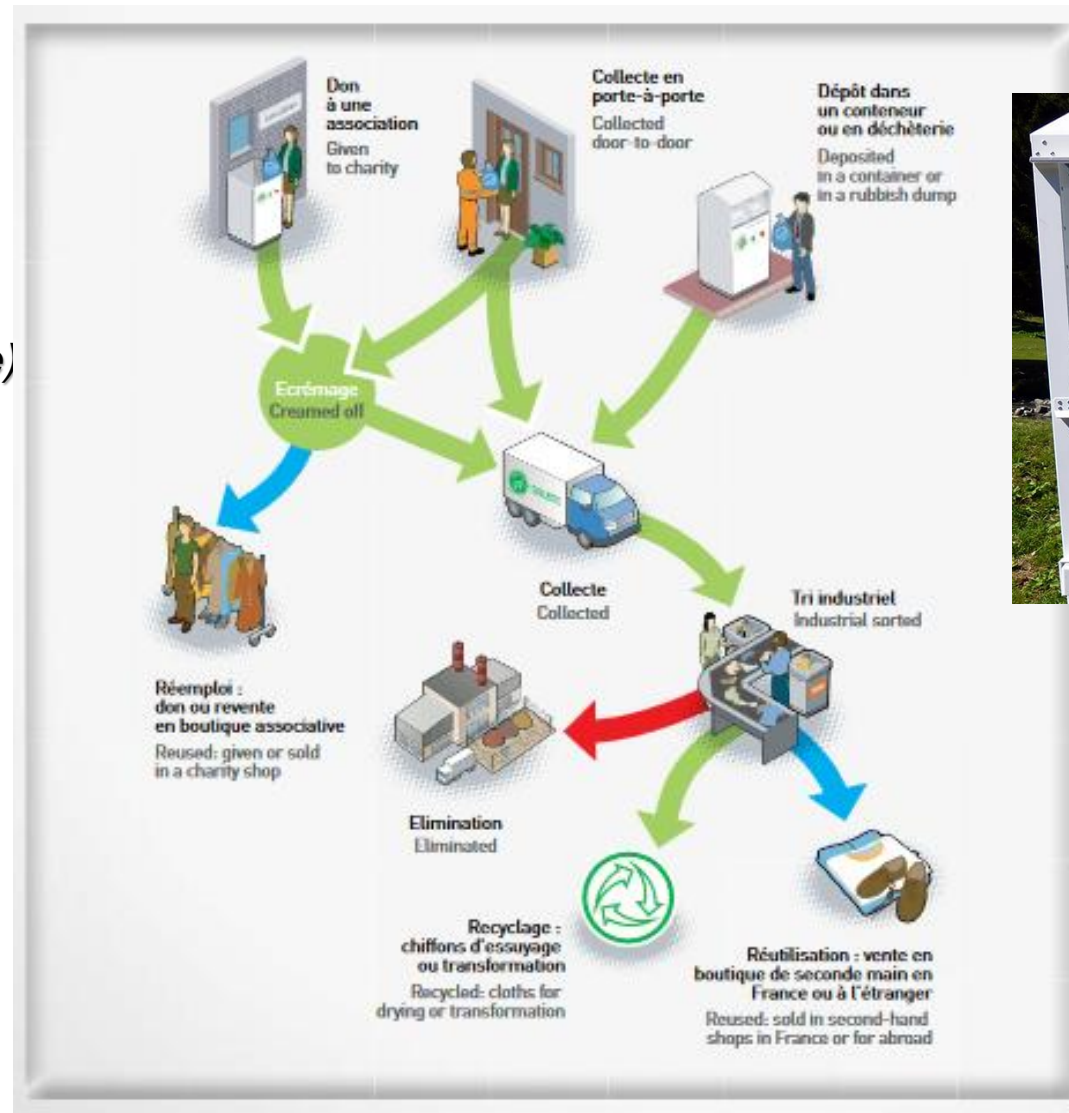
Les gisements sont dispersés, volumineux et de compositions 'matière' très différentes

## Textiles de l'habillement TLC

2,5 milliards d'articles mis sur marché en France / an (100 milliards dans le Monde)

Pays Country	Habitants Inhabitant	Collecte totale (en tonnes / an) Total collection (in tonnes / year)	Collecte (par habitant et par an) Collection (per inhabitant per year)
BENELUX	27 millions	150 000	5,5 kg
ALLEMAGNE Germany	82 millions	700 000	8,5 kg
USA	302 millions	1 500 000	5 kg
FRANCE	65 millions	140 000	2 kg

Source: <https://refashion.fr/eco-design>



# CIRCULARITE & MATERIAUX

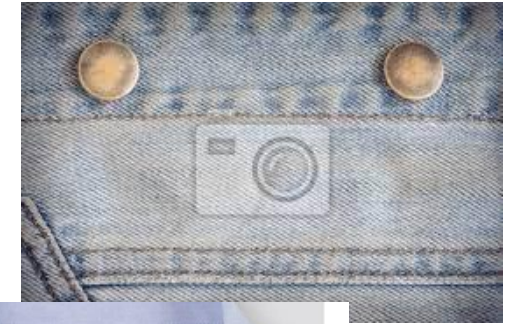
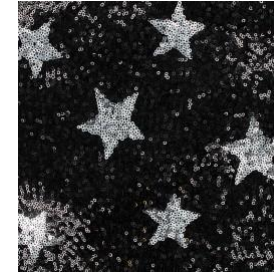
## Présence dans les gisements de nombreux perturbateurs de tri

### Textiles de l'habillement TLC

- Grande variabilité des sources
- Présence de perturbateurs de recyclage

Source: Techniques de l'Ingénieur

Catégorie	Fonction	Éléments perturbateurs	Composition possible
Attache	Sert à attacher/liier deux pans.	Fermeture à glissière	Nylon, Métal/Co, Nylon/Co
	Sert à attacher/liier deux pans.	Bouton	Métal, nacre, bois, corne, PET, résine, cuir.
	Sert à attacher/liier deux pans.	Bandebourg	Cuir, bois, PET
	Sert à attacher/liier deux pans.	Agrafe	Métal, PET, résine.
	Sert à attacher/liier deux pans.	Fermeoir	Métal, résine.
	Sert à attacher/liier deux pans.	Boucle	Métal, PET, résine.
	Sert à attacher/liier deux pans.	Pression	Métal, PET, résine.
	Sert à attacher/liier deux pans.	Fil de couture /couture	PET, coton.
	Sert à attacher/liier deux pans.	Mousqueton	Métal, résine, PET, nylon.
	Sert à attacher/liier deux pans.	Crochet	Métal, nylon.
Sert à attacher/liier deux pans.	Tressage/cordon	PET, Coton, PA.	
	Renfort circulaire qui sert à passer un lacet, tresse, etc.	Oeillet	Métal.
Transmettre des informations	Sert à informer sur la marque.	Etiquette tissée	PET, coton.
	Sert à informer sur la composition et les conseils d'entretiens.	Etiquette imprimée	PET.
	Sert à informer sur la marque ou simplement esthétique.	Etiquette simili-cuir	PET, PUR.
	Sert à retranscrire des informations et d'anti vol.	Puce RFID	Pet, cuivre, Coton.
Caractère majoritairement fonctionnel	Sert à réfléchir/émettre de la lumière.	Bande réfléchissante	Pigment, nylon, base textile variée.
	Sert à réfléchir/émettre de la lumière.	Bande phosphorescente	Pigment, nylon, base textile variée.
	Apporte du maintien.	Bande antidérapante	Nylon, elasthanne.
	Apporte de l'élasticité au textile.	Bande élastique	Elastodiène.
	Sert à solidifier une couture ou simplement esthétique	Rivet	Métal.
	Sert à structurer le vêtement ou simplement esthétique.	Epaulette	Composite base textile/non tissé/mousse.
	Sert à bloquer et à ajuster al longueur d'un cordon.	Arrêt cordon	Métal, nylon, PET.
	Sert d'armature pour soutenir et modeler la poitrine.	Baleine (SG)	Métal.
	Sert d'armature pour rigidifier le col.	Baleine de col	Métal, plastique.
	Sert de bague de fixation et renforce l'armature du soutien gorge.	Anneau	Métal, bois.
	Sert à structurer l'article.	Mousse	PUR.
	Sert à créer un compartiment.	Fond de poche	PET, coton.
Apporte du confort ou simplement esthétique.	Doublure	PET, viscose.	
Caractère majoritairement esthétique	Sert à informer sur la marque ou simplement esthétique.	Ecusson	Fibres naturelles, synthétiques, artificelles.
	Uniquement pour l'esthétisme du textile.	Dentelle	Fibres naturelles, synthétiques, artificelles.
	Uniquement pour l'esthétisme du textile.	Broderie	Fibres naturelles, synthétiques, artificelles.
	Uniquement pour l'esthétisme du textile.	Empiècement	Fibres naturelles, synthétiques, artificelles.
	Uniquement pour l'esthétisme du textile.	Strass/paillette	Fibres naturelles, synthétiques, artificelles.
	Uniquement pour l'esthétisme du textile.	Perle	Fibres naturelles, synthétiques, artificelles.
	Uniquement pour l'esthétisme du textile.	Pompon	Fibres naturelles, synthétiques, artificelles.
	Uniquement pour l'esthétisme du textile.	Nœuds	Fibres naturelles, synthétiques, artificelles.
	Uniquement pour l'esthétisme du textile.	Pendentif	Fibres naturelles, synthétiques, artificelles.
	Uniquement pour l'esthétisme du textile.	Breloque	Fibres naturelles, synthétiques, artificelles.



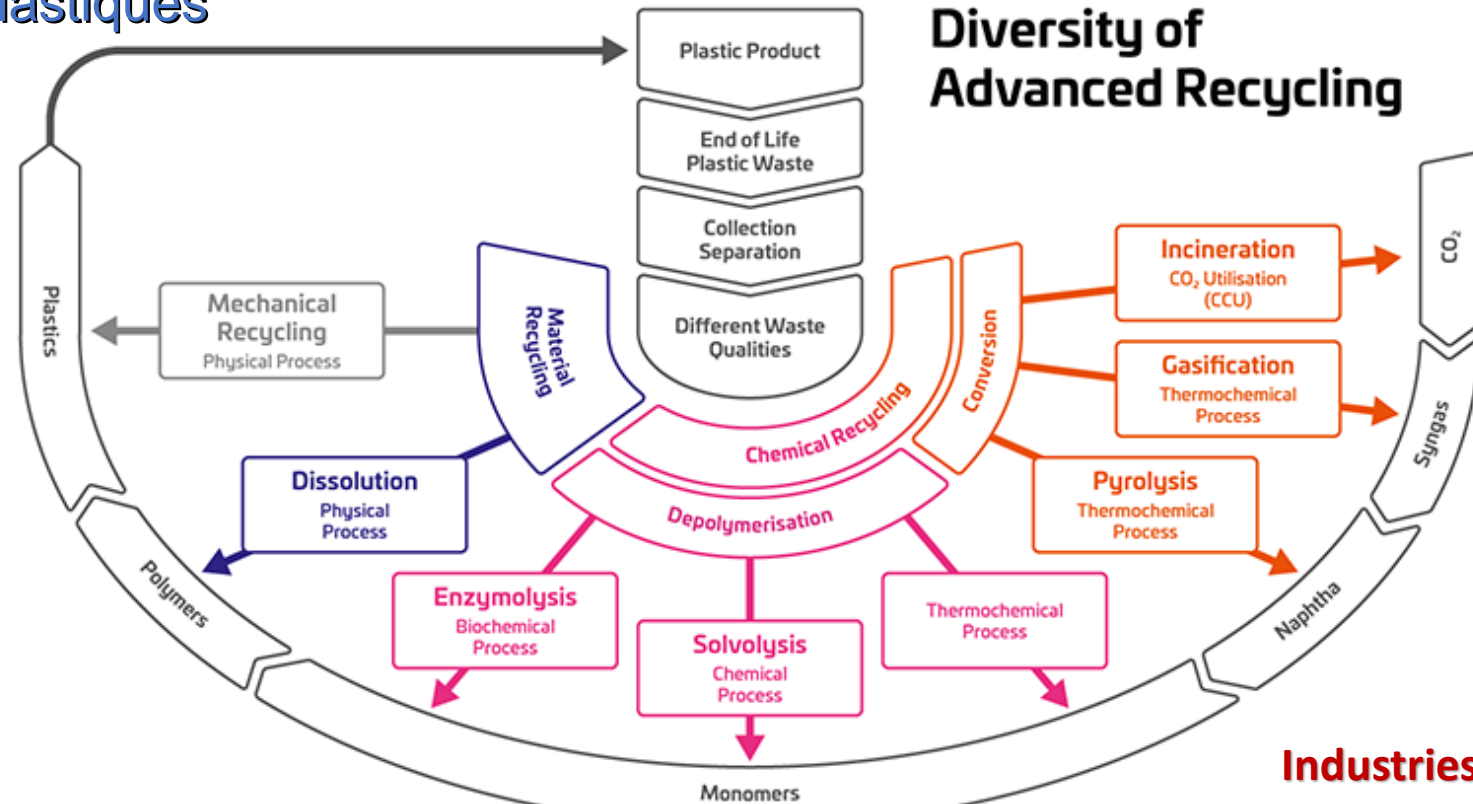
# CONTRAINTES ÉCONOMIQUES ET GÉO-POLITIQUES

## Concurrence entre différentes filières de recyclage

### Procédés de recyclage des plastiques



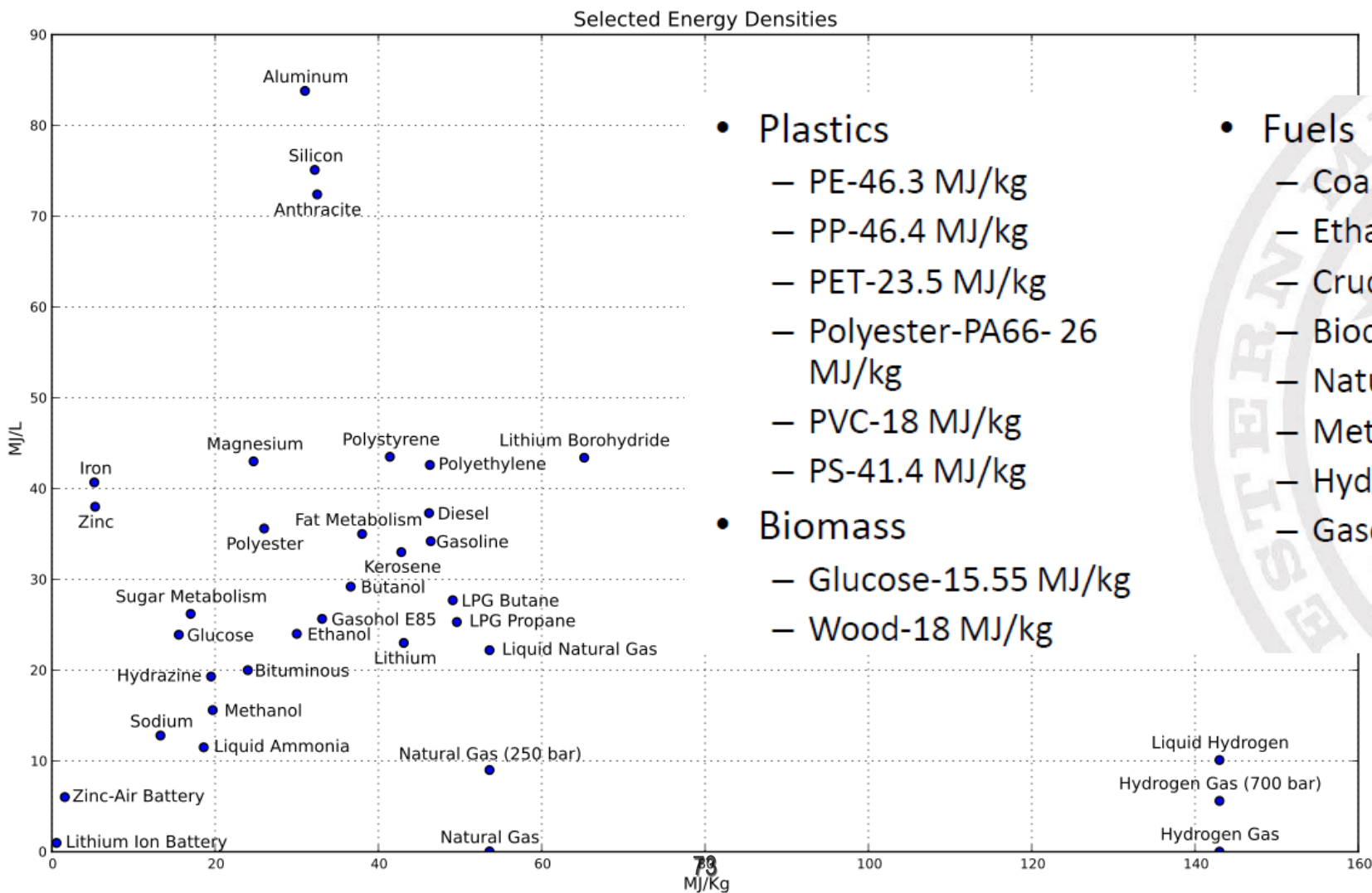
Industries de la plasturgie



Industries de la chimie lourde

# CONTRAINTES ÉCONOMIQUES ET GÉO-POLITIQUES

## Compétition valorisations matière ou énergie suivant prix des cours des matières et du pétrole / gaz



- Plastics

- PE-46.3 MJ/kg
- PP-46.4 MJ/kg
- PET-23.5 MJ/kg
- Polyester-PA66- 26 MJ/kg
- PVC-18 MJ/kg
- PS-41.4 MJ/kg

- Fuels

- Coal-32.5 MJ/kg
- Ethanol-30 MJ/kg
- Crude Oil-46.3 MJ/kg
- Biodiesel- 42.2 MJ/kg
- Natural Gas- 53.6 MJ/kg
- Methane-55.6 MJ/kg
- Hydrogen Gas- 143 MJ/kg
- Gasoline- 46.4 MJ/kg

- Biomass

- Glucose-15.55 MJ/kg
- Wood-18 MJ/kg

# CONTRAINTES ÉCONOMIQUES ET GÉO-POLITIQUES

**Le recyclage est-il rentable ? A quel coût ? Pour quels produits ?  
En acceptant quels déchets ultimes / rejets ?**

## *Cas des batteries Li*

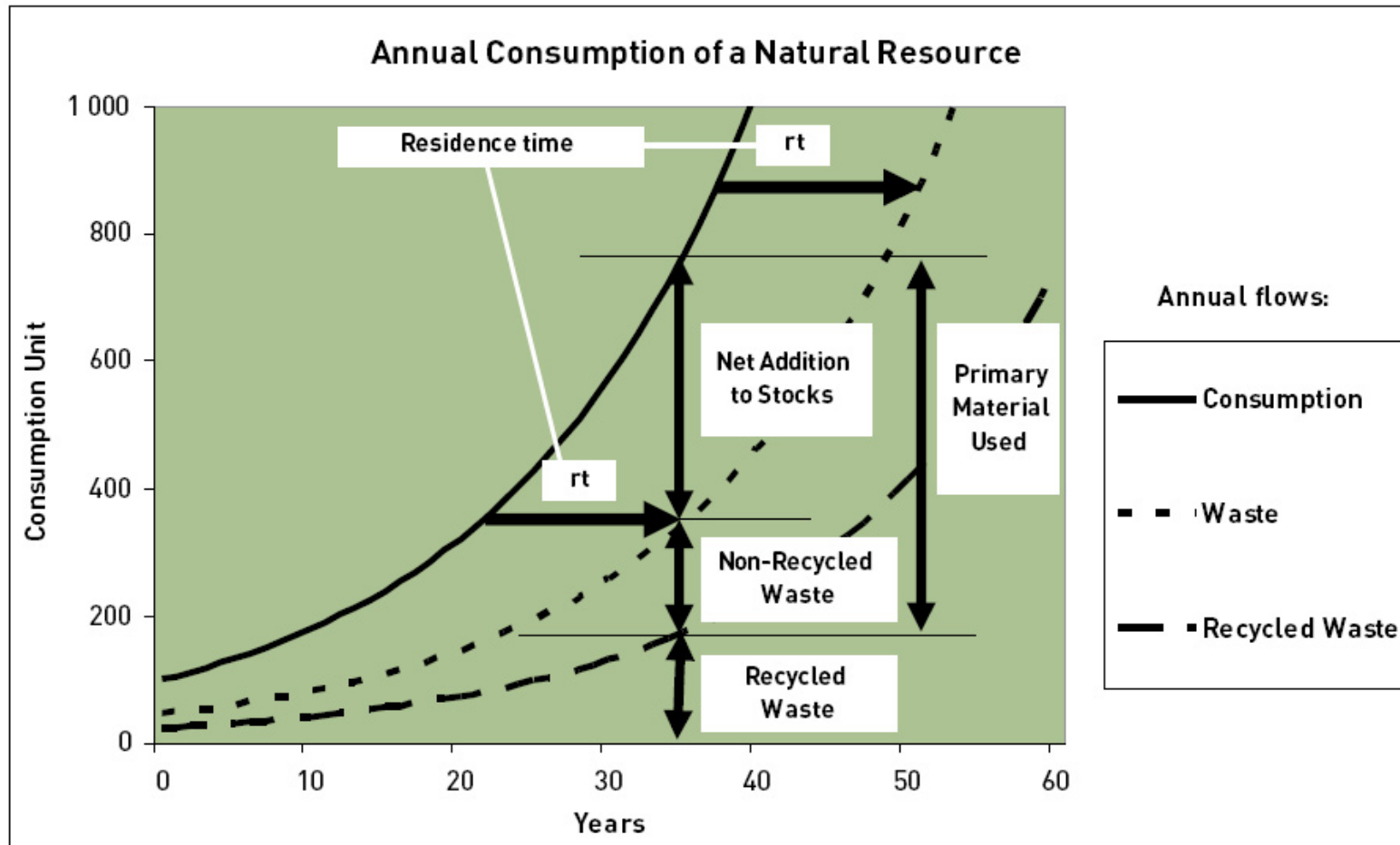
Comparison of different LiB recycling methods Best  Worst

	Technology readiness	Complexity	Quality of recovered material	Quantity of recovered material	Waste generation	Energy usage	Capital cost	Production cost
Pyrometallurgy	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Hydrometallurgy	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Direct recycling	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

	Presorting of batteries required	Cathode morphology preserved	Material suitable for direct re-use	Cobalt recovered	Nickel recovered	Copper recovered	Manganese recovered	Aluminium recovered	Lithium recovered
Pyrometallurgy	.....	No	No	.....	.....	.....	.....	No	.....
Hydrometallurgy	.....	No	No	.....	.....	.....	.....	.....	.....
Direct recycling	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

# CONTRAINTES ÉCONOMIQUES ET GÉO-POLITIQUES

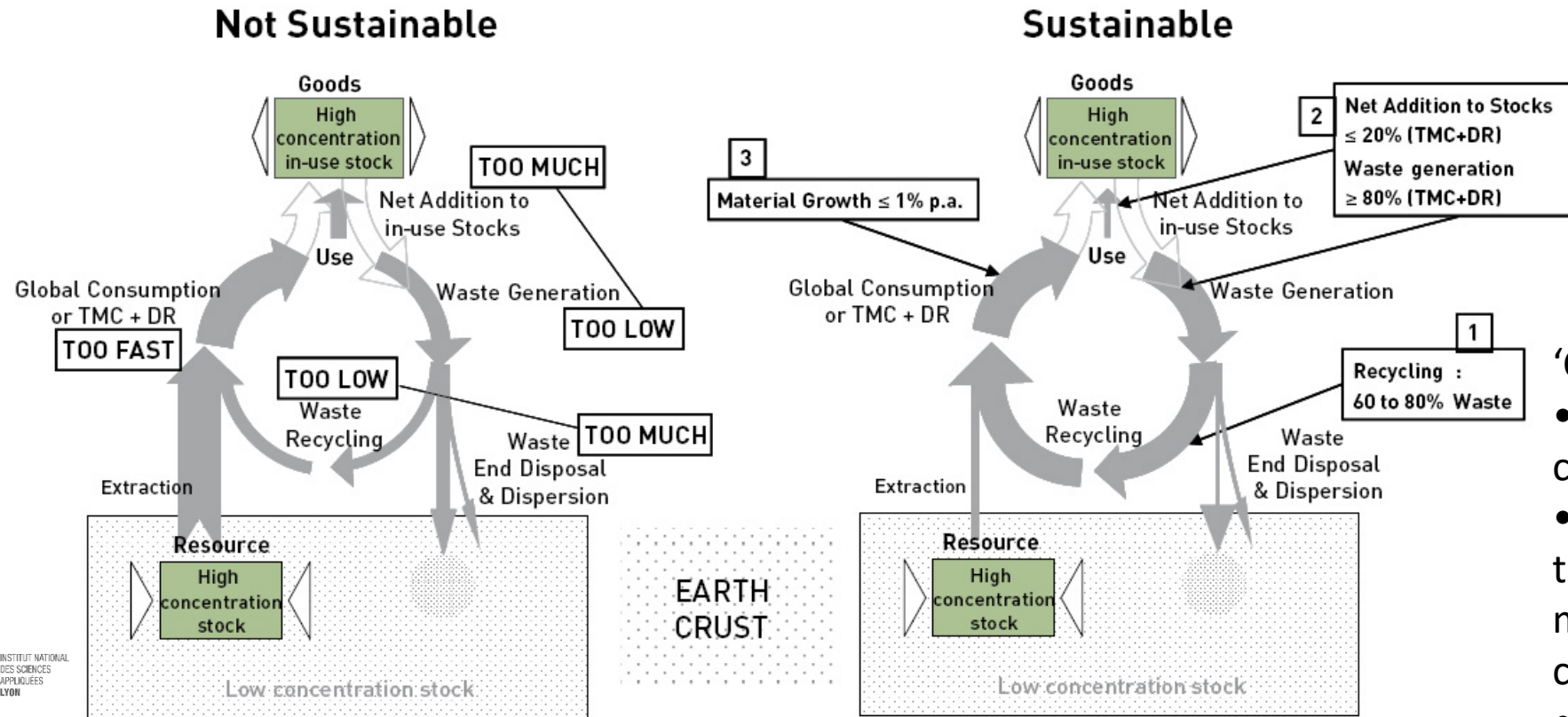
## Compatibilité du recyclage avec la croissance économique?



Relationship between residence time in the economy and net addition to stocks

# CONTRAINTES ÉCONOMIQUES ET GÉO-POLITIQUES

## Compatibilité du recyclage avec la croissance économique?



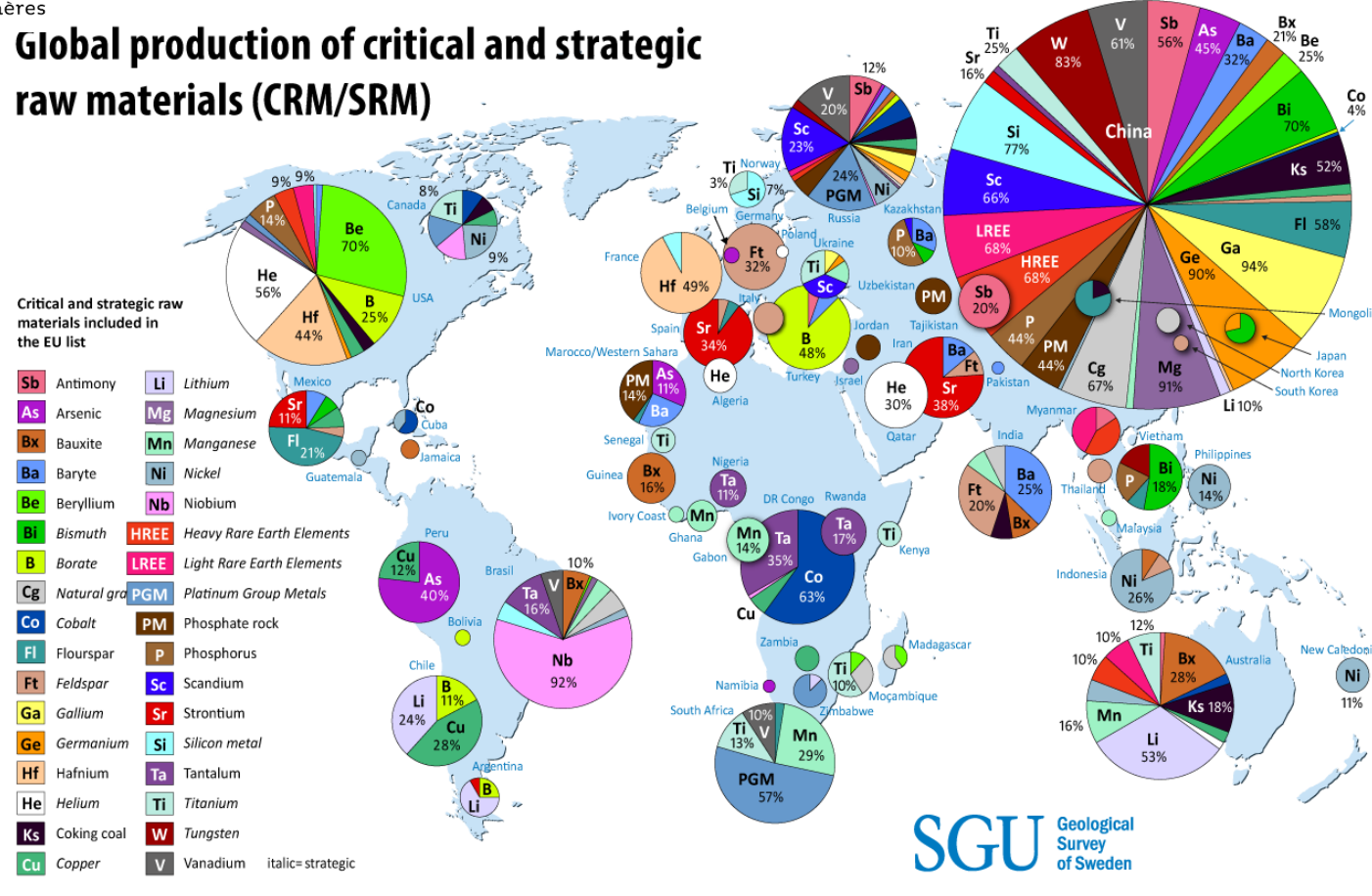
‘Conditions:

- It experiences low material consumption growth,
- It accumulates very little and therefore produces almost as much material waste as it consumes,
- It recycles most of its non-renewable material waste’.

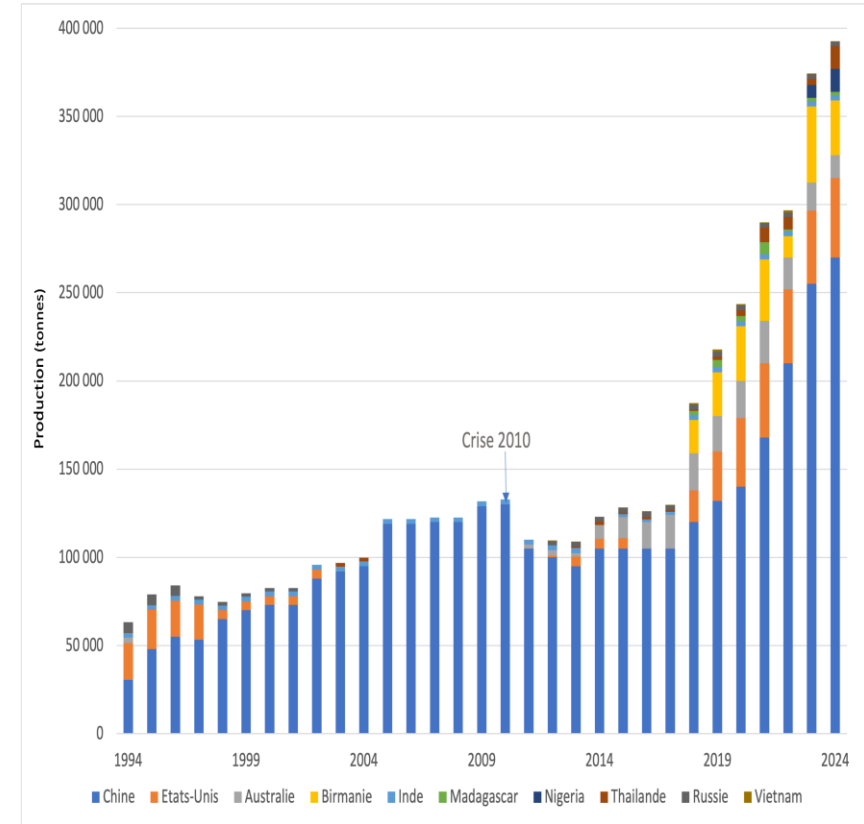
# CONTRAINTES ÉCONOMIQUES ET GÉO-POLITIQUES

## Géostratégie des ressources et de la demande

### Global production of critical and strategic raw materials (CRM/SRM)



<https://www.sgu.se/en/mineral-resources/critical-raw-materials/>



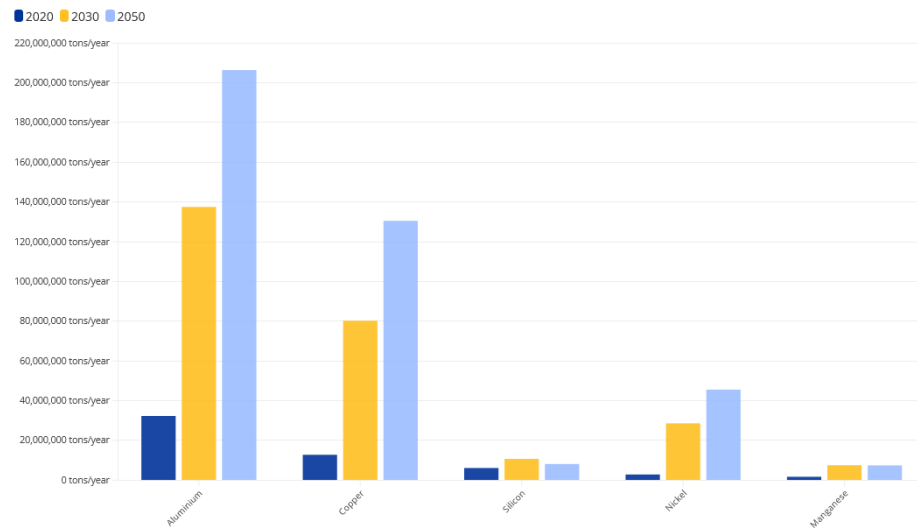
Évolution de la production mondiale d'ETRs entre 1994 et 2024 (en tonnes, USGS)

Une demande croissante pour chaque type de SRM (Strategic Raw Material) et la réalité géo-stratégique

# CONTRAINTES ÉCONOMIQUES ET GÉO-POLITIQUES

Un constat établi des vulnérabilités sur les ressources au regard de la demande qui devrait amener à une plus grande circularité des matières

Material demand in the European Union (high demand scenario):



Source: European Commission

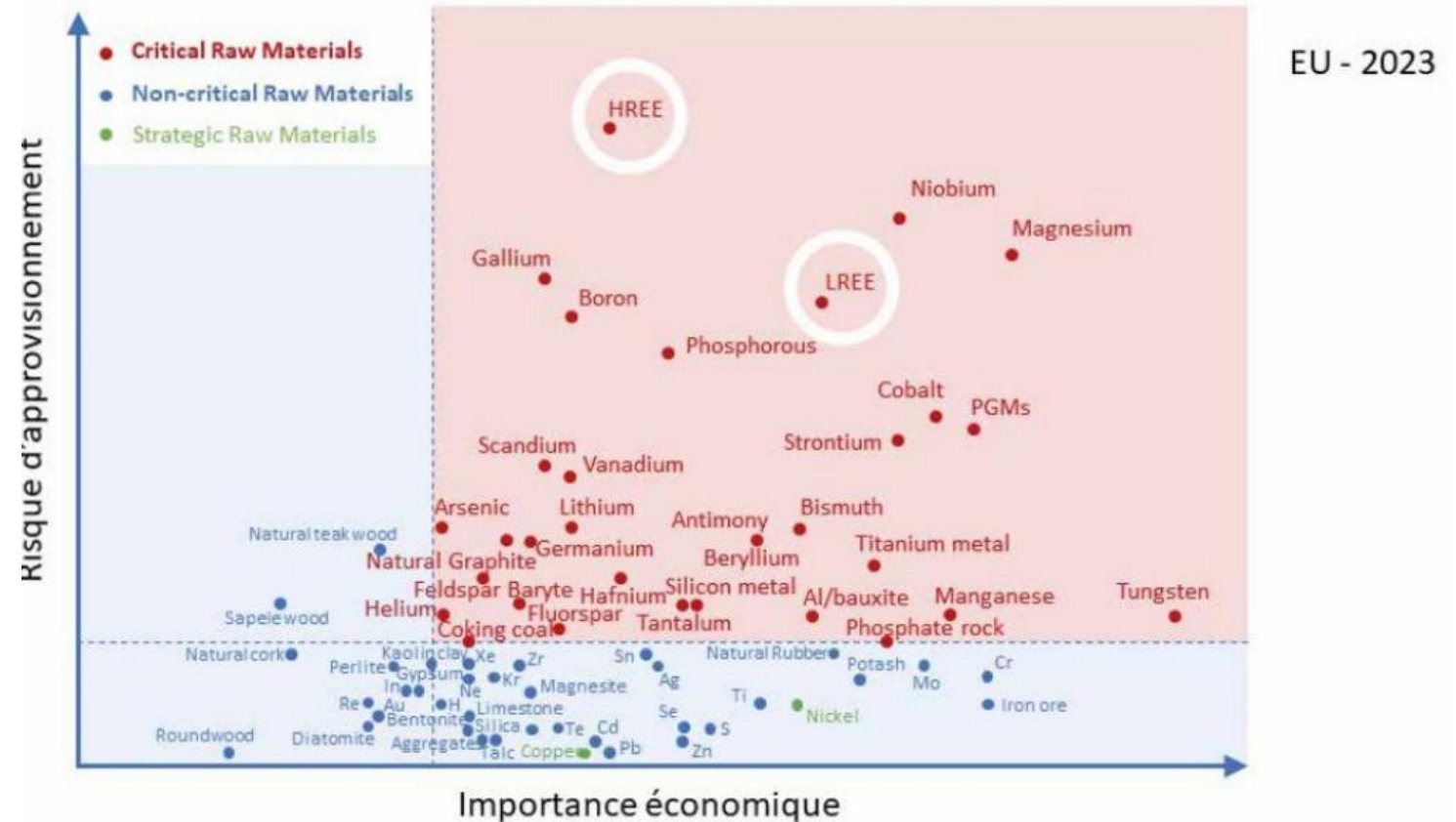


Figure 8 : Évaluation de la criticité de différents éléments. HREE et LREE se réfèrent aux ETR lourds et légers respectivement (Heavy/Light Rare Earth Elements). Source : Schéma adapté du CRMA européen (Study on the Critical Raw Materials for the EU 2023 — Final

# CONTRAINTES ÉCONOMIQUES ET GÉO-POLITIQUES

## Une géostratégie des déchets



<https://worldloop.org/e-waste/illegal-flows/>

Electronic Waste Dump of the World: Guiyu, China



# CONTRAINTES ÉCONOMIQUES ET GÉO-POLITIQUES

## Coûts du recyclage et flux des DEEE



# CONTRAINTES ÉCONOMIQUES ET GÉO-POLITIQUES

Un constat qui conduit à des trajectoires européennes ambitieuses

Des objectifs (très ambitieux) EU pour la circularité par le recyclage des SRMs

## European Critical Raw Materials Act

2030 benchmarks for strategic raw materials:



### EU EXTRACTION

At least **10%** of the EU's annual consumption for extraction



### EU PROCESSING

At least **40%** of the EU's annual consumption for processing



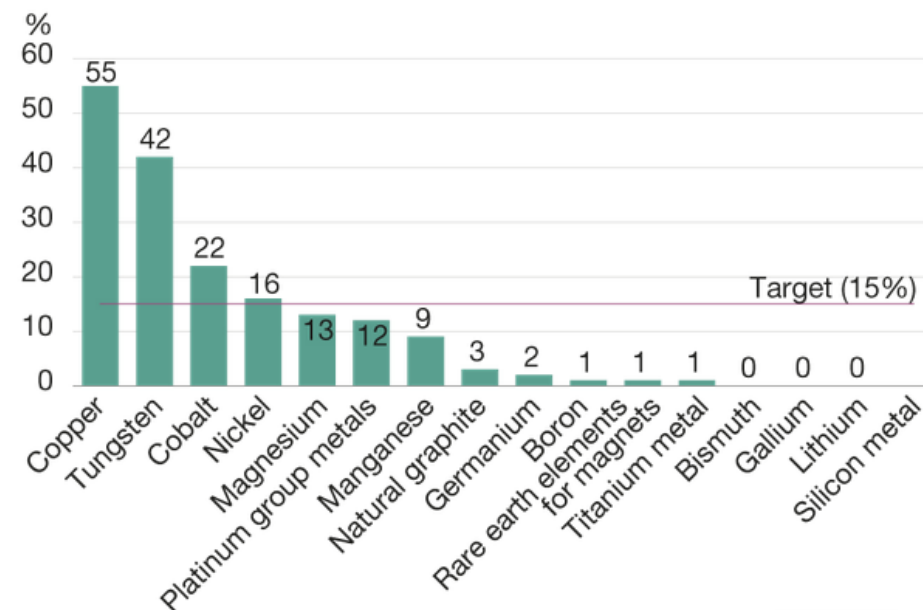
### EU RECYCLING

At least **15%** of the EU's annual consumption for recycling



### EXTERNAL SOURCES

Not more than **65%** of the EU's annual consumption of **each strategic raw material at any relevant stage of processing** from a single third country

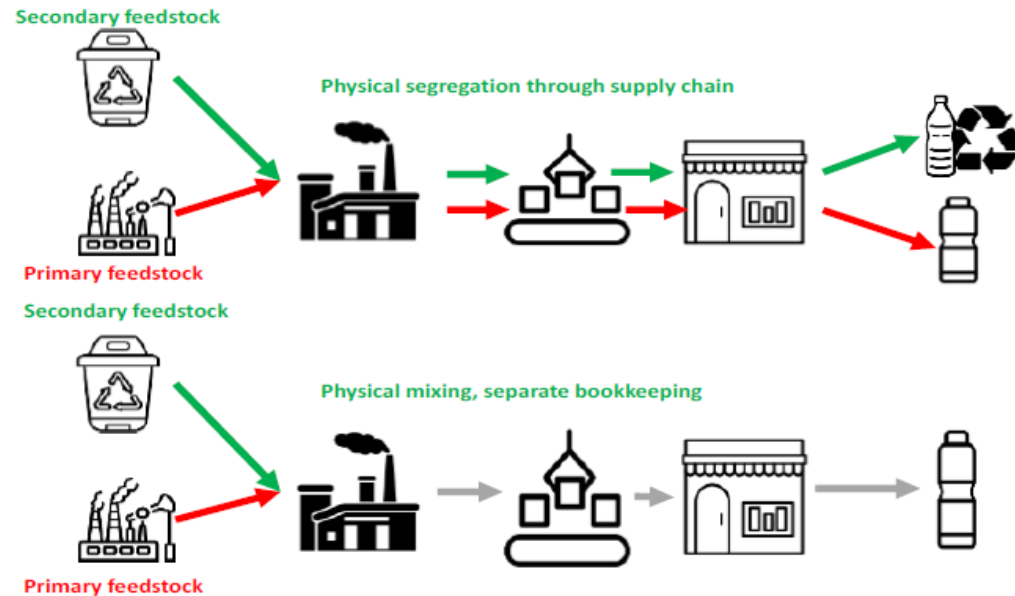


Current end-of-life recycling input rates for strategic raw materials and Critical Raw Materials Act target

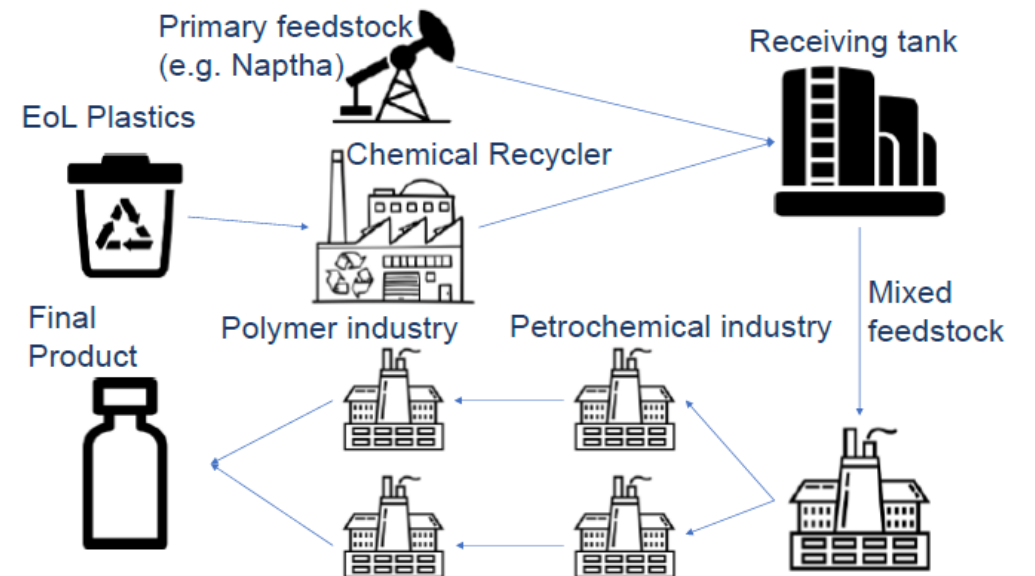
# PLACE ET POIDS DES RÉGLEMENTATIONS

## Mais quelle traçabilité pour les matières recyclées ? La 'mass balance'

Comparison of segregation (top) mass-balance (bottom)



Mixing of chemically recycled material with primary equivalent



Davidson P. et al., Packaging News (2022)

# FREINS CULTURELS ET SOCIÉTAUX

## Appropriation par les acteurs / citoyens

### LEÇON N° 1:

**RECYCLER, TRIER OU RÉPARER  
PLUTÔT QUE JETER AU SOL**



### Consignes de tri

Embballages en métal, couvercles

Embballages et briques en carton

Tous les papiers se trient et se recyclent

Bouteilles et flacons en plastique

Autres emballages en plastique, pensez à séparer l'opercule ou le film de l'emballage

Les emballages :  
 • en vrac, sans sac  
 • bien vidés,  
 • non lavés.

Une seconde vie pour les emballages !



C'EST SIMPLE, TOUS LES EMBALLAGES ET PAPIERS SE TRIENT !

<b>DANS LE BAC JAUNE</b>		Papiers, emballages en carton, métal et plastique, séparés les uns des autres et sans sac.
<b>DANS LE BAC BLANC</b>		Bouteilles, bocaux et pots en verre, bien vidés.
<b>DANS LE BAC MARRON</b>		Les déchets alimentaires, dans un sac compostable.
<b>DANS LE BAC VERT OU GRIS</b>		Ce qui reste après avoir fait le tri. Avant de jeter un déchet dans cette poubelle, vérifier qu'il ne va pas plutôt dans un bac de tri.

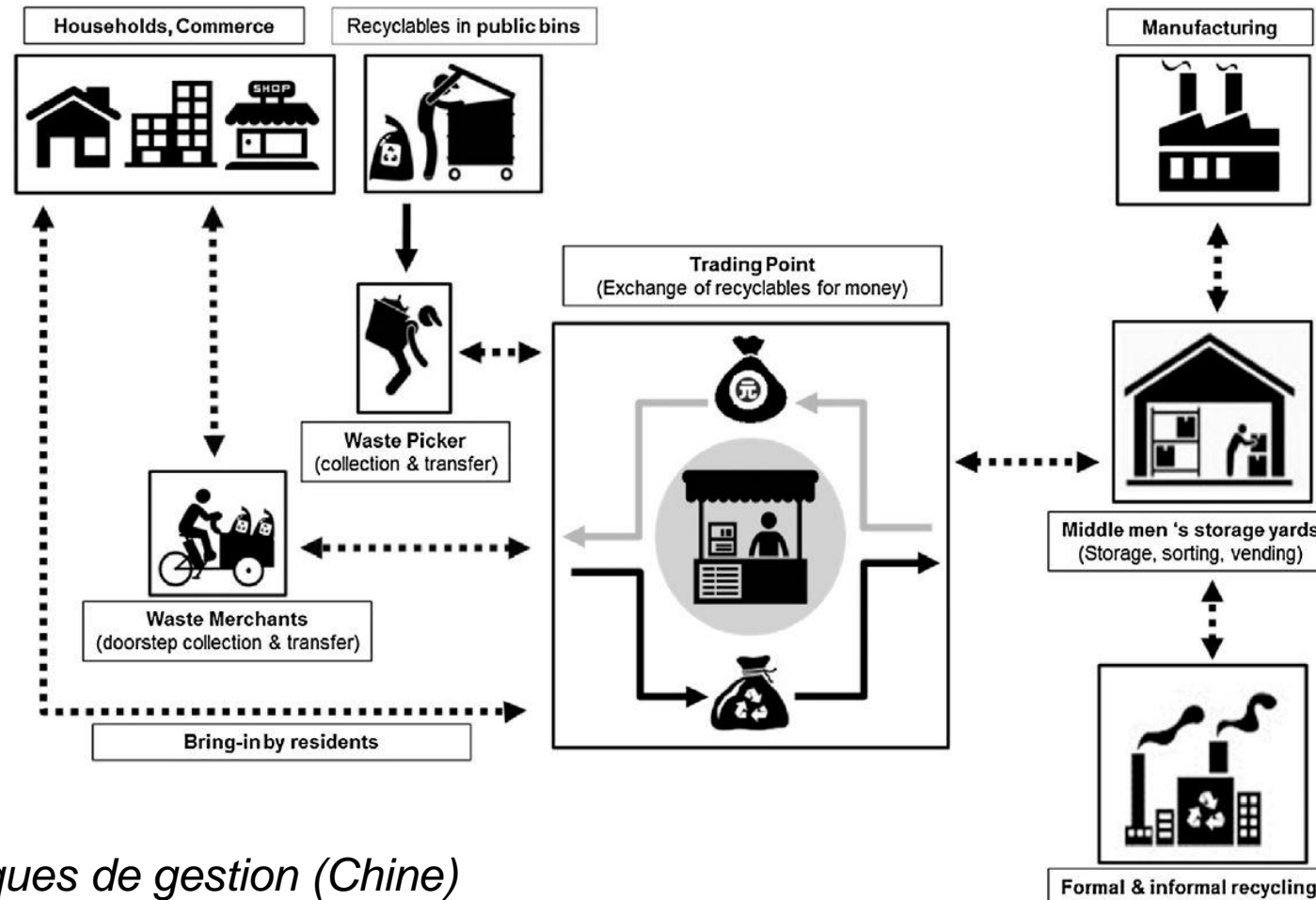
## Le tri + simple

Aujourd'hui, TOUS LES EMBALLAGES et TOUS LES PAPIERS se trient

Les papiers		
Journaux, prospectus, magazines	+	Enveloppes, papiers de bureaux, courriers
	+	Cahiers, annuaires, catalogues, livres
Les emballages		
en papier et en carton	en métal	en plastique
Sacs, sachets	Bidons, aérosols	Bouteilles, flacons (avec bouchons)
	+	Boîtes, pots, blisters, emballages sous vide, barquettes
Boîtes, cartons	Conserves, barquettes, canettes	
	+	Boîtes, tubes, couvercles
Briques (avec bouchons)	Boîtes, tubes, couvercles	
	+	Sacs, sachets, tubes, sur-emballages, films plastique
	+	Capsules à café, petits contenants

# FREINS CULTURELS ET SOCIÉTAUX

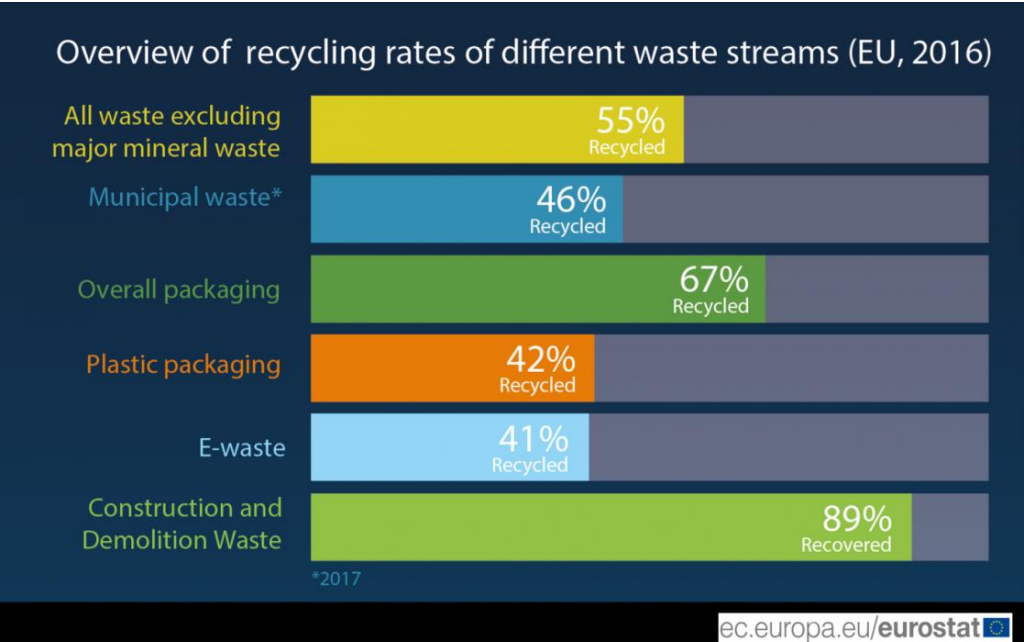
Pratiques de gestion et de collecte non encore suffisamment déployés



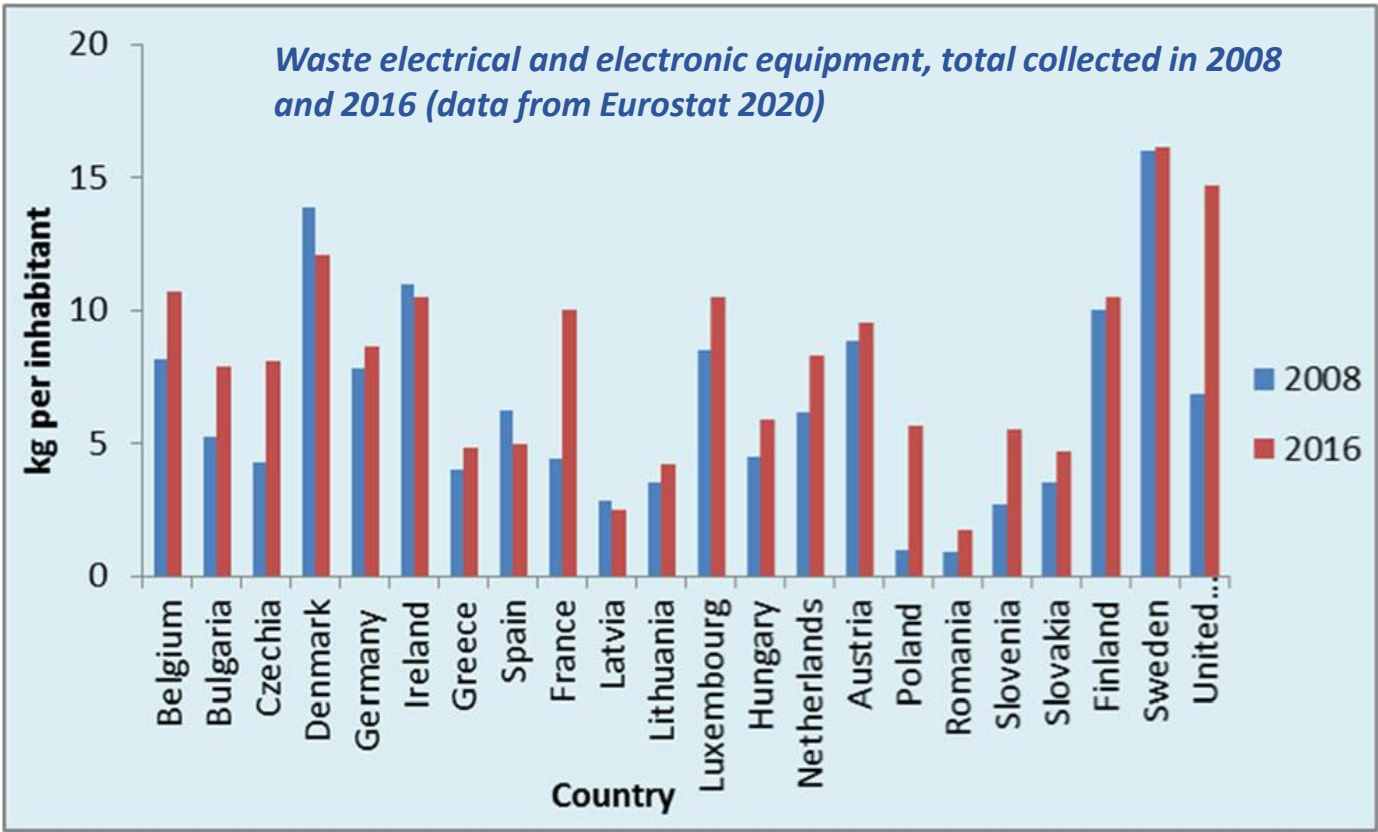
Pratiques de gestion (Chine)

# FREINS CULTURELS ET SOCIÉTAUX

Pratiques de gestion et de collecte déployés de manière très hétérogène



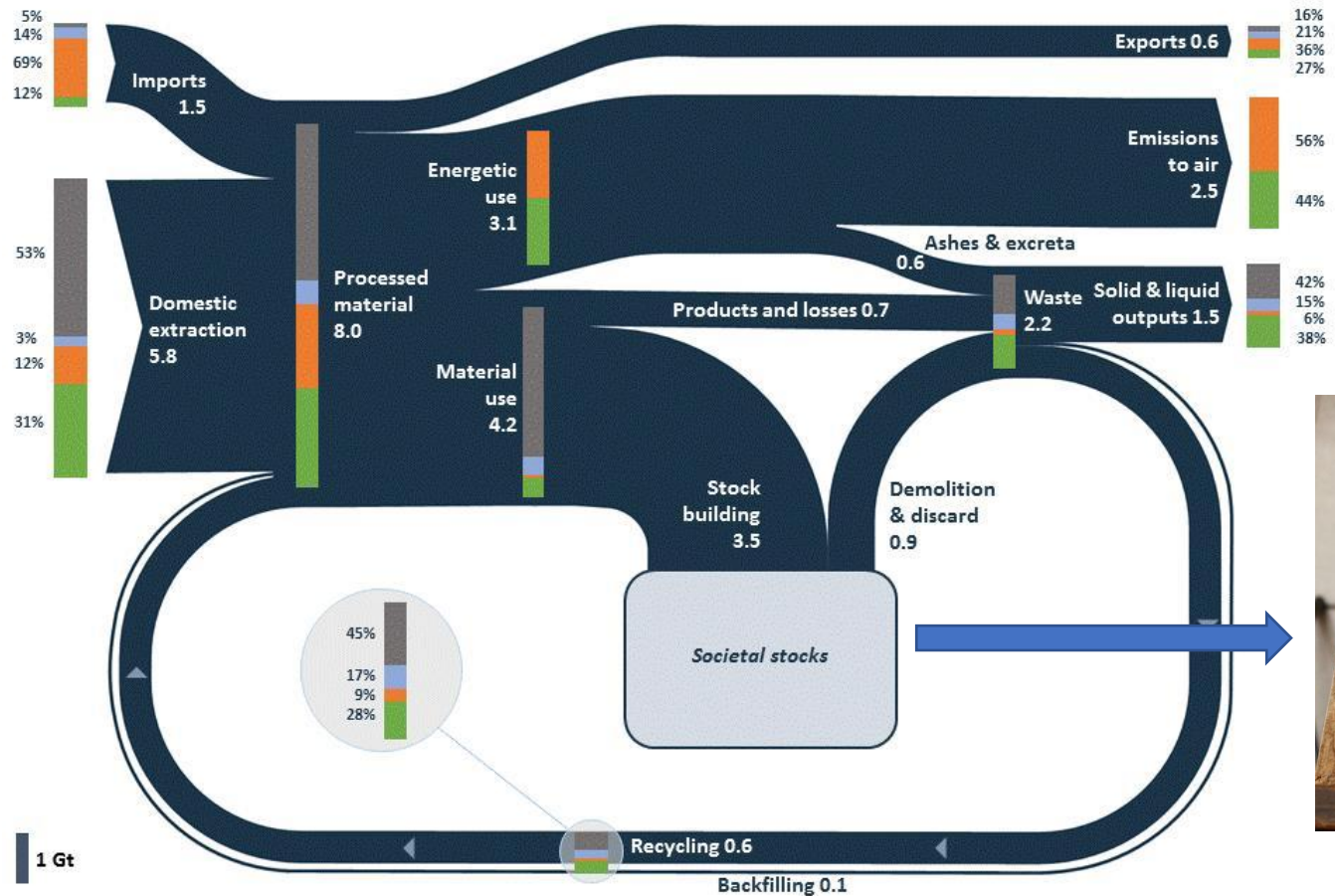
[https://www.eeas.europa.eu/node/59123\\_en](https://www.eeas.europa.eu/node/59123_en)



M.A. Charitopoulou et al., *Env. Sci. A Poll. Res.* (2021), 28, 59190

# FREINS CULTURELS ET SOCIÉTAUX

Sankey diagram on material flows in the EU economy (2014)



Circularité des matières et matériaux 'en stock' amenés en fin de vie après temps longs (plusieurs années) notamment pour déchets du numérique  
Défis composition / normes



# ECONOMIE CIRCULAIRE & MATERIAUX

## Contribution à l'économie circulaire / Matériaux responsables

### **Pouvoir être ré-utilisé**

- . sous sa forme initiale
- . sous d'autres formes pour d'autres usages (avec l'empreinte la plus faible)

### **Reconcevoir des matériaux**

- . à base de ressources renouvelables
- . intégrant les étapes de fin de vie
- . Intégrant leur analyse du cycle de vie

## RECYCLABILITE DES MATIERES



### **Repenser leurs procédés de formulation et mise en forme**

- . économes en énergie et matières (sans solvants)
- . assemblage
- . permettant agilité/personnalisation

### **Etre capable de s'auto-réparer**

- . pouvoir se réparer sous un stimulus externe
- . savoir s'auto-réparer

### **Répondre spécifiquement à un usage**

- . intégrer une multifonctionnalité
- . répondre à des stimuli externes

# Sommaire

1.- INTRODUCTION GENERALE – CONTEXTE GENERAL  
ENJEUX DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE (DES MATIERES)

2.- MATERIAUX DU NUMERIQUE ET LEUR RECYCLAGE

3.- ECONOMIE CIRCULAIRE DES MATIERES  
REQUIS ET FREINS A LA CIRCULARITE

**4.- AUTRES MODELES ECONOMIQUES DE CIRCULARITE**

# ESPR ECODESIGN FOR SUSTAINABLE PRODUCTS REGULATION



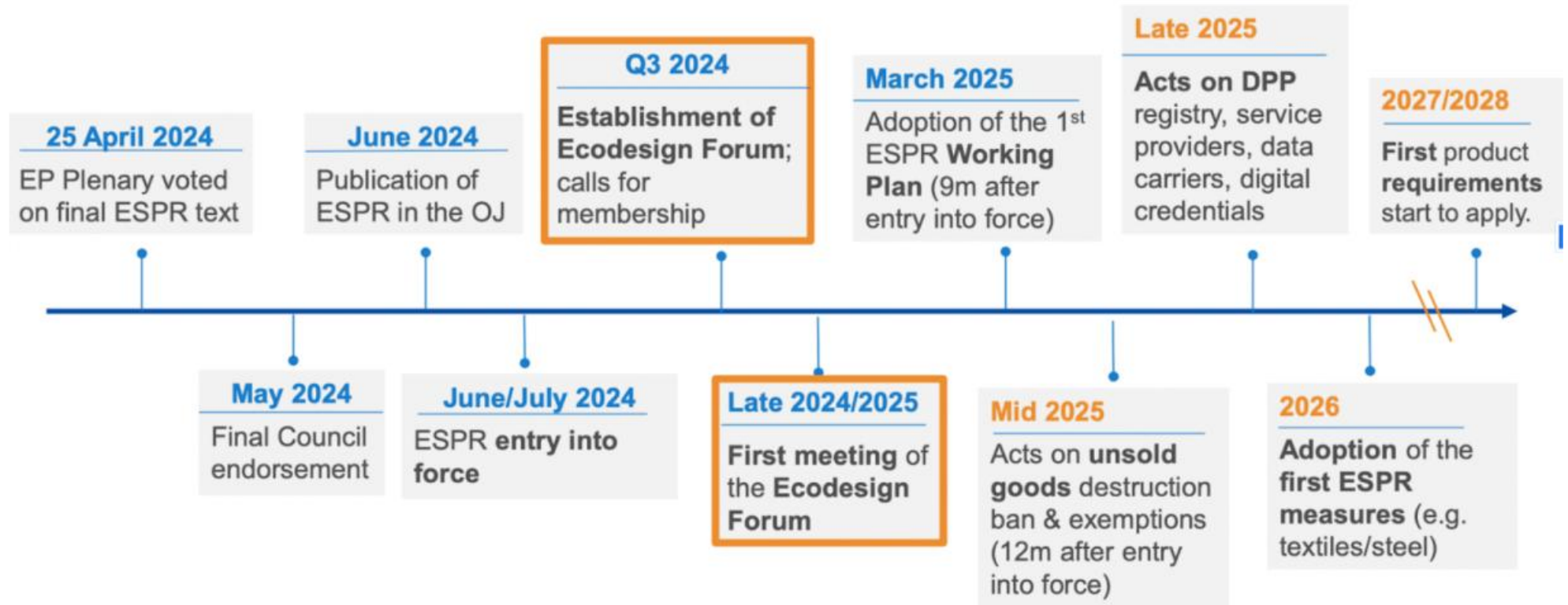
## Nouveau règlement européen sur l'écoconception des produits durables

(adopté par le Parlement le 25 avril 2024)

Objectif: Renforcer la circularité de nos produits et ainsi les rendre plus durables d'un point de vue environnemental.

# ESPR ECODESIGN FOR SUSTAINABLE PRODUCTS REGULATION

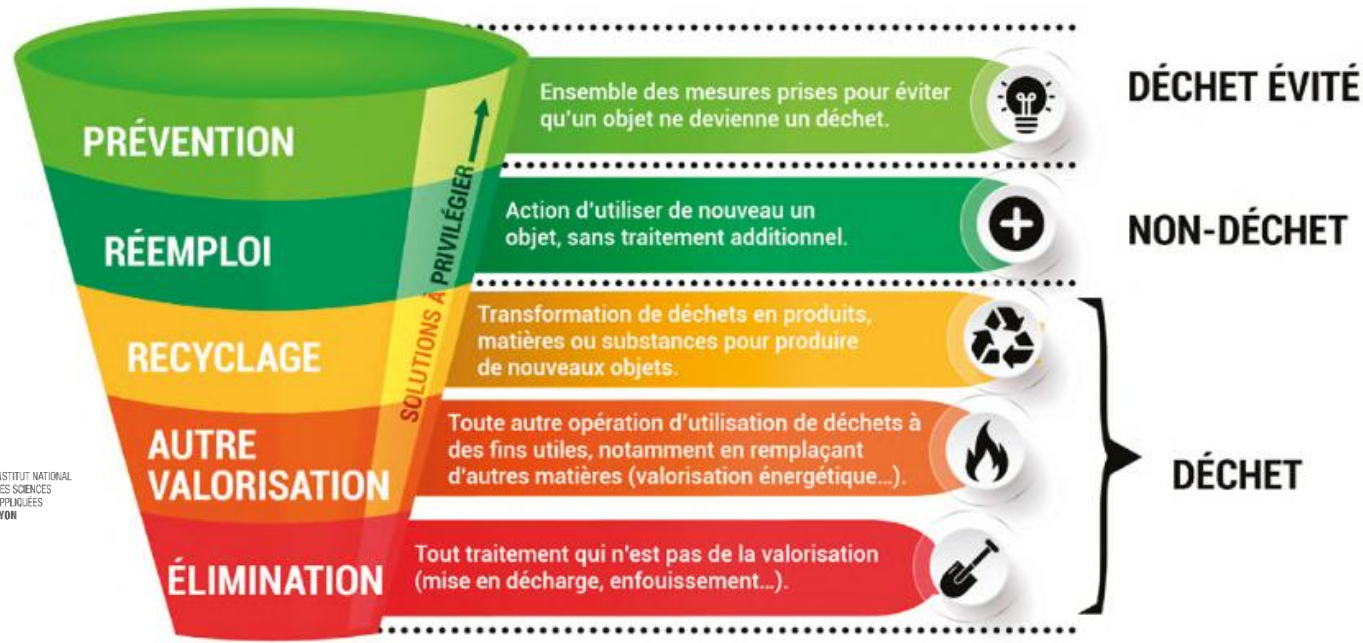
## ESPR: tentative timeline & milestones



# LE RECYCLAGE: LA DERNIÈRE SOLUTION À ENVISAGER (DERNIER R)

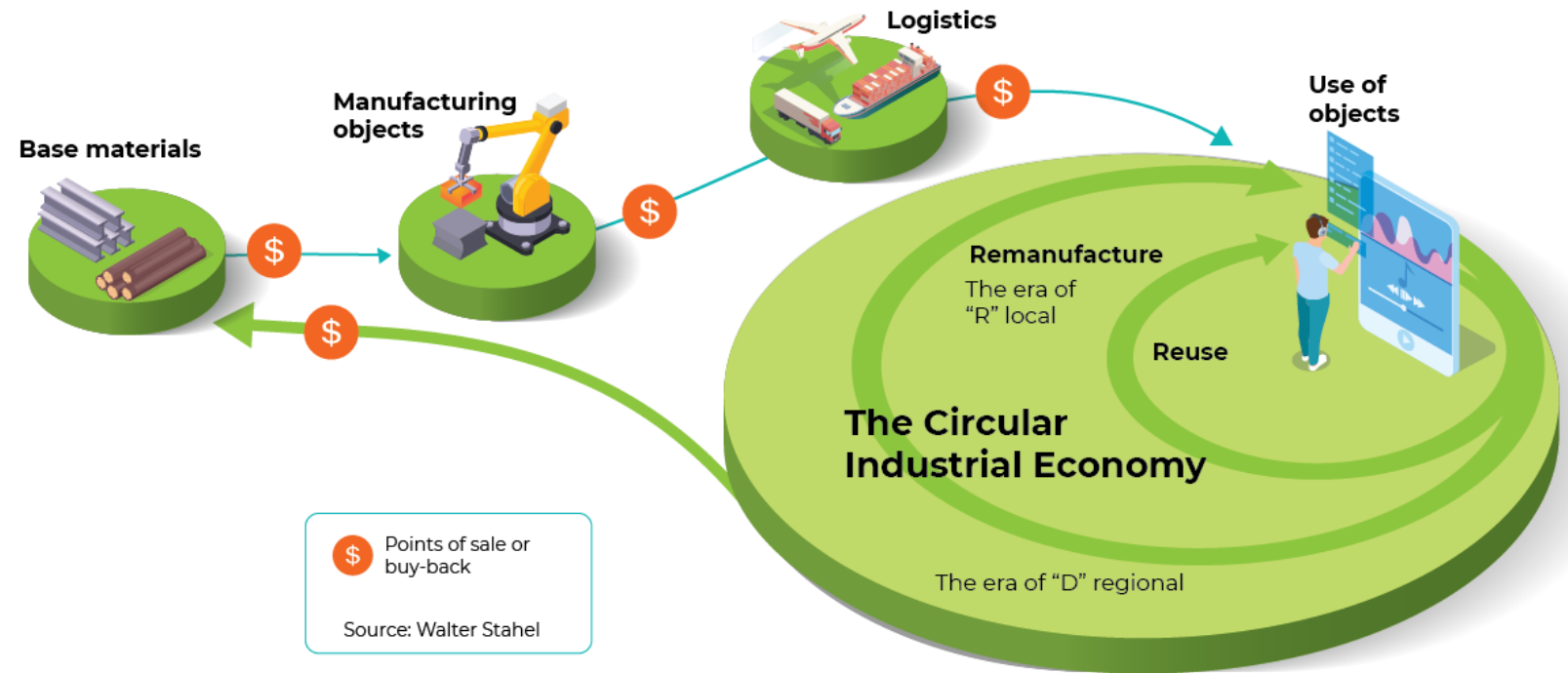
## LA HIÉRARCHIE DES MODES DE TRAITEMENT DES DÉCHETS

Cette hiérarchie établit un ordre de priorité pour le traitement de nos rejets. Définie dans l'article L. 541-1 II du code de l'environnement, elle classe les solutions de gestion des plus déconseillées aux plus recommandées.



# LES OBJECTIFS DE L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE INDUSTRIELLE

- *Préserver les actifs naturels, culturels, humains et financiers,*
- *Préserver la valeur et l'utilité des objets manufacturés sur le long terme en vue d'une réutilisation future,*
- *Préserver la valeur et la pureté des atomes et des molécules sur une longue période en vue d'une réutilisation future,*
- *Respecter la propriété des utilisateurs et imposer la responsabilité des fabricants sur le long terme.*



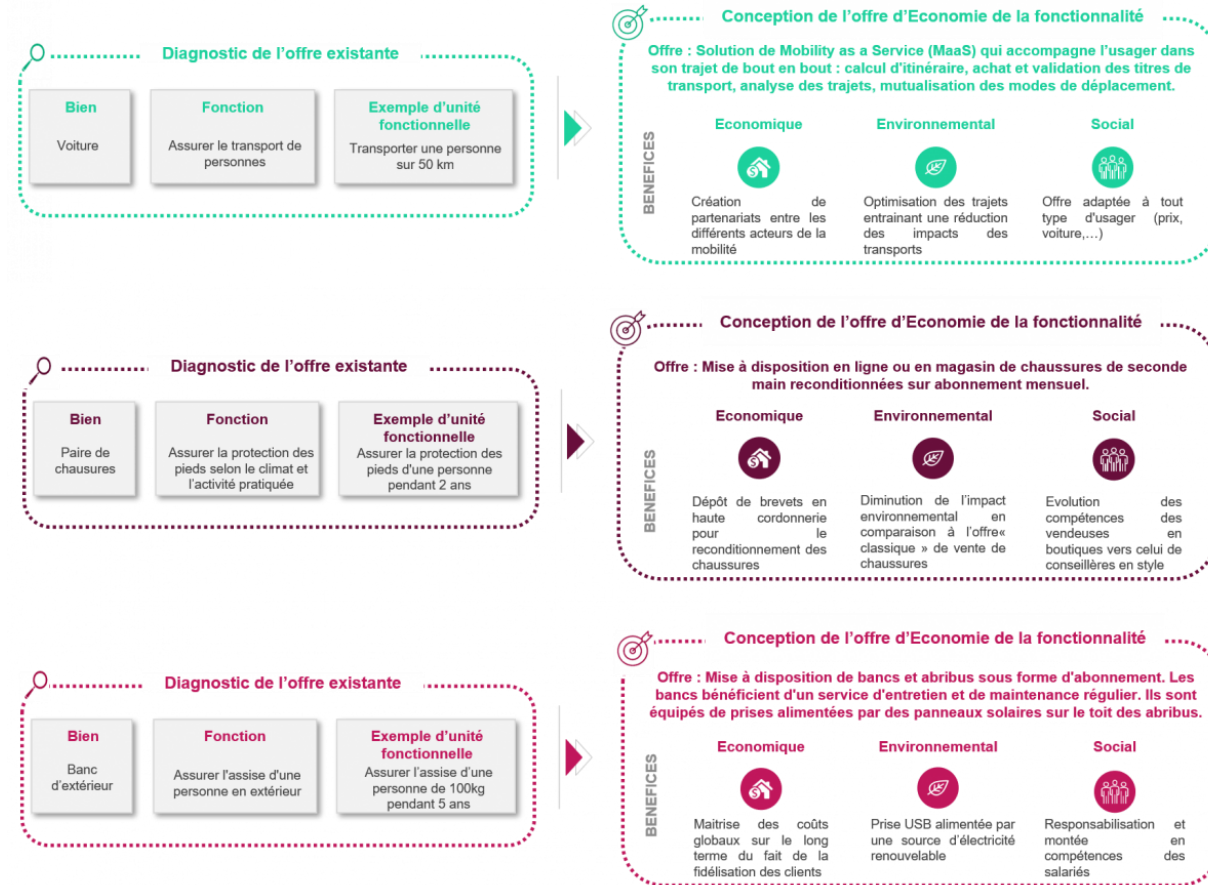
# L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE DE LA FONCTIONNALITÉ /DE LA PERFORMANCE

## Economie de fonctionnalité

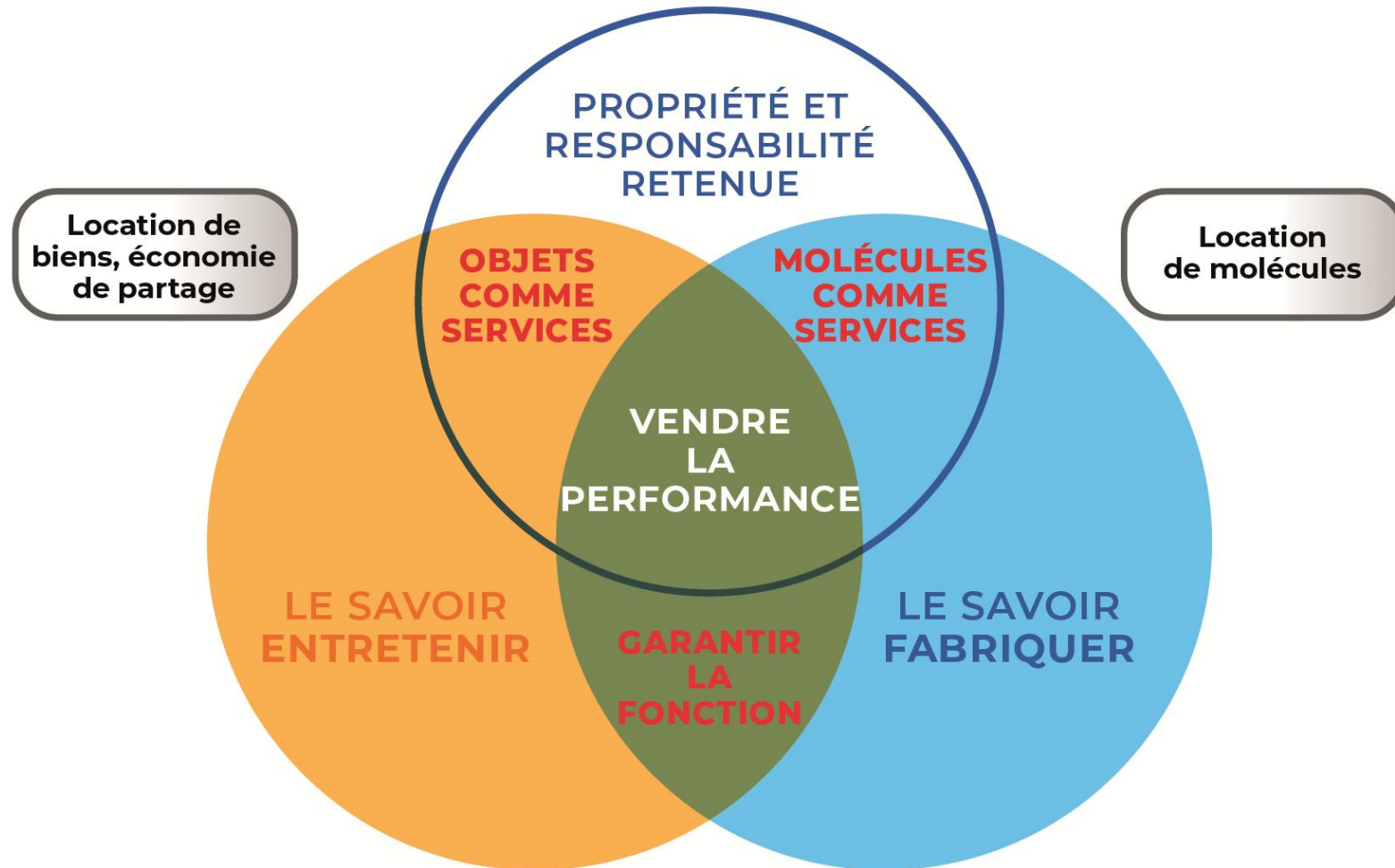
- optimise l'usage ou la fonction des biens et services
- se concentre sur la gestion des richesses existantes, sous la forme de biens, de connaissances et de capital naturel.

*L'objectif économique en est de créer une valeur d'usage la plus élevée possible pendant le plus longtemps possible, tout en consommant le moins de ressources matérielles et d'énergie possible » (Stahel, 2006 : 145).*

## Méthodologie pour la mise en place d'une offre d'économie de la fonctionnalité



# L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE DE LA FONCTIONNALITÉ/PERFORMANCE



# L'ÉCONOMIE CIRCULAIRE DE LA FONCTIONNALITÉ/PERFORMANCE

*Nécessité de développer (pas seulement) une nouvelle métrique*

## Material Intensity per Unit Service (MIPS)

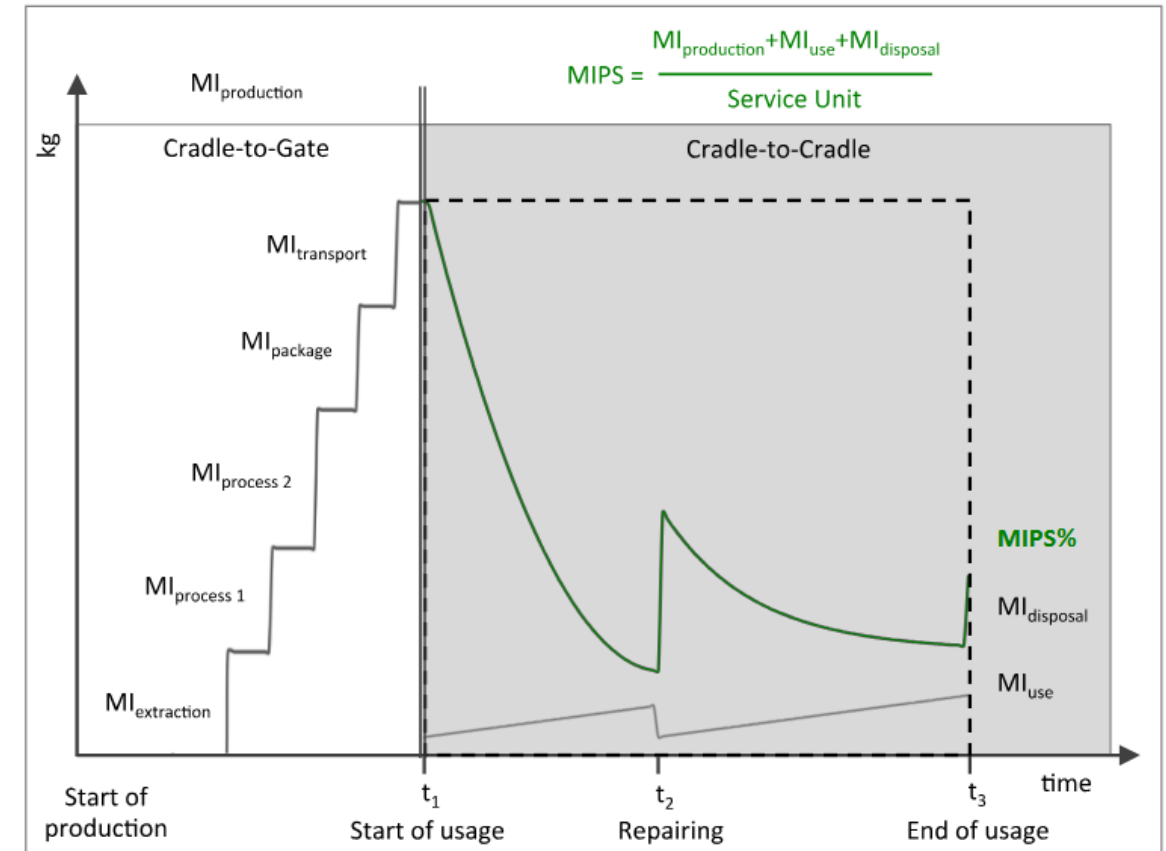
metric quantifying the total mass of materials required, throughout the life cycle, to provide a specific functional unit of service or utility.

## Législation adaptée

**Producteur-Fabricant d'origine est le Propriétaire Ultimentement Responsable (PUR) portant la Responsabilité Civile Complète des Producteurs (RCCP)**

*Responsabilité civile complète des producteurs (RCCP) crée une boucle de responsabilité civile invisible par laquelle les biens et matériaux sans valeur à la fin de leur vie d'usage sont renvoyés à leur fabricant.*

*La mise en place de la responsabilité civile complète des producteurs (RCCP) entraînerait son intégration dans les bilans financiers des producteurs comme un passif ouvert qui s'accumule chaque année.*



C. Liedtke et al., Resource Use in the Production and Consumption System—The MIPS Approach. Resources, 2014

**Avec mes remerciements !**