

Colloque national Aussois 2024 – Mécamat

Simulation & instrumentation des procédés de fabrication

Vers une amélioration du recyclage des métaux et alliages

Mathilde Laurent-Brocq

mathilde.laurent-brocq@cnrs.fr

Institut de Chimie et des Matériaux de Paris Est
CNRS - UPEC



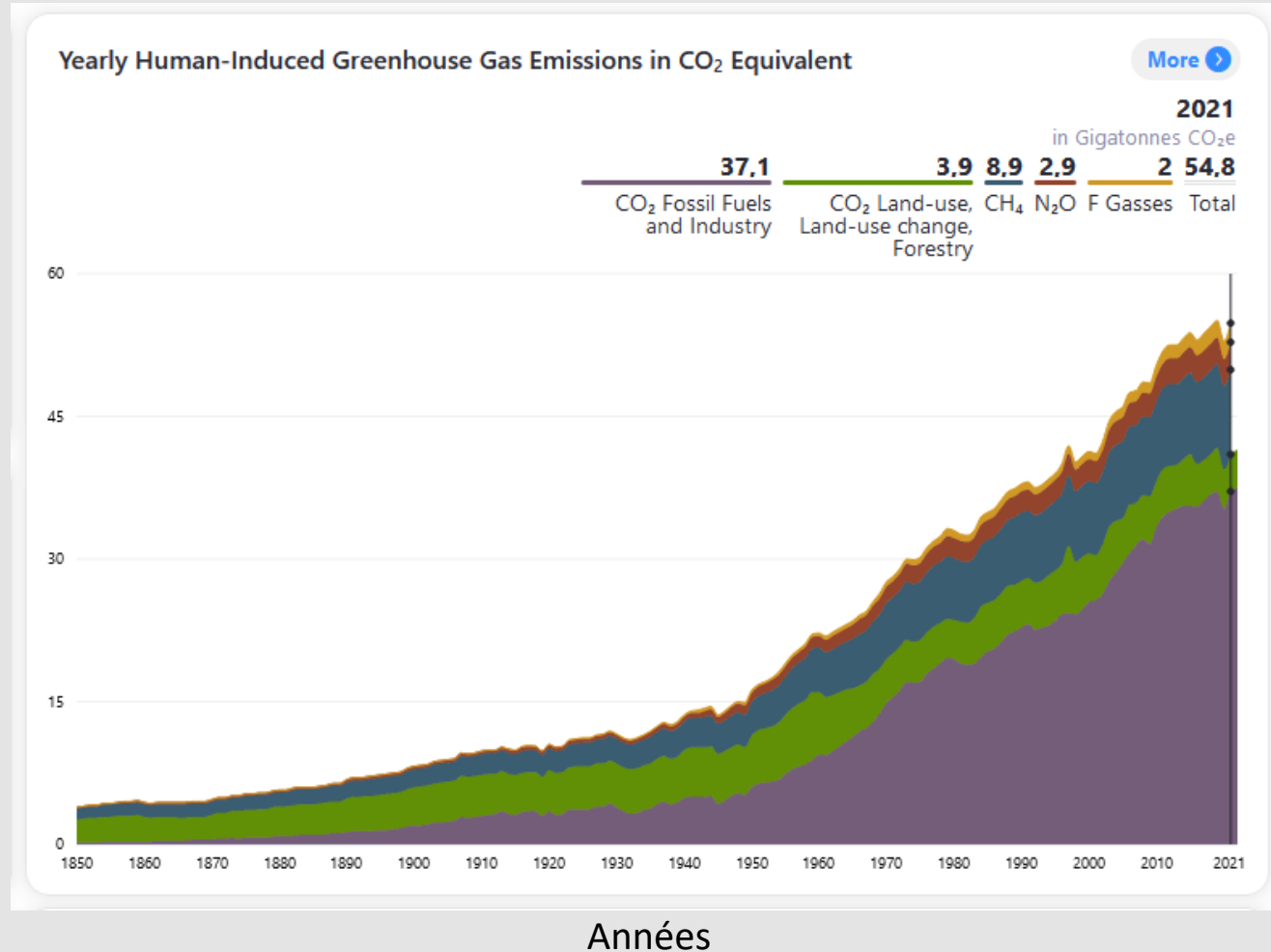
Sommaire

- Introduction
- **Partie 1 : Cycle de vie et recyclage des métaux et alliages**
 - *Exercices de détection de green-washing*
- **Partie 2 : Le recyclage par voie solide**
 - *Présentation du compte Instagram o_mon_labo*
- **Conclusion et ouverture**
 - *Faut-il continuer à balayer les vagues ?*

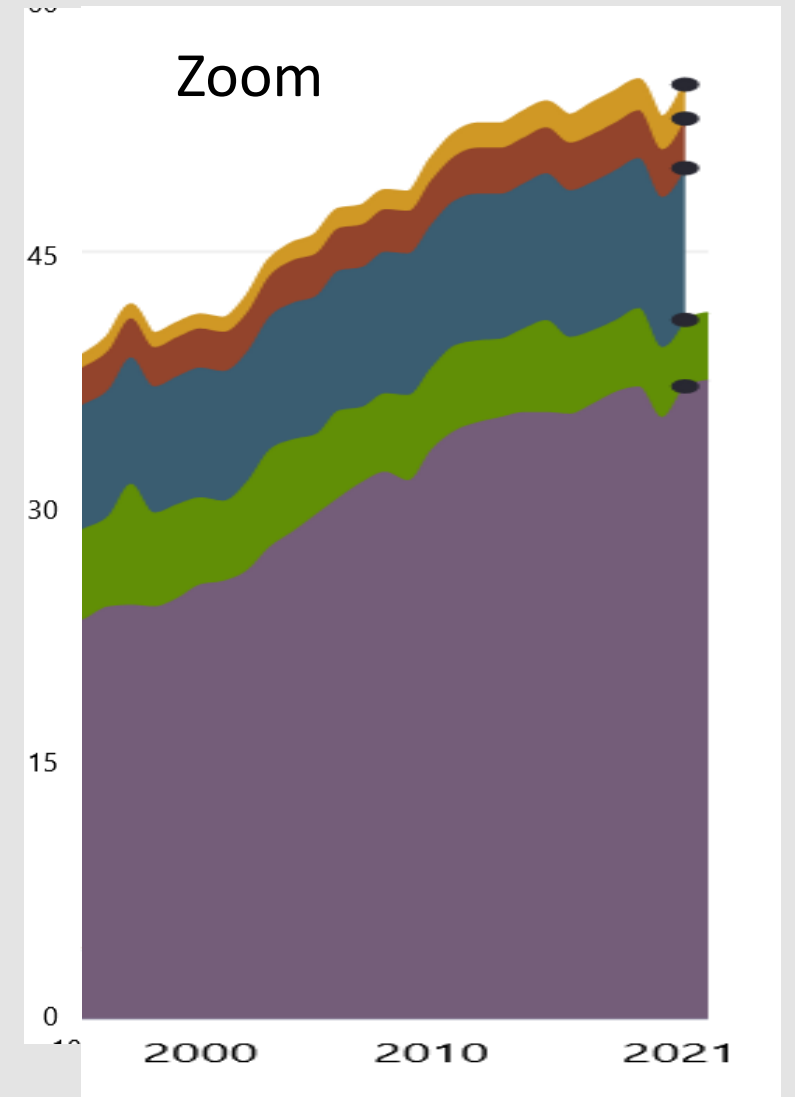
CO₂ (10⁶
tonnes)

Les émissions de CO₂ augmentent

Emissions (Gigatonnes de CO_{2,eq})

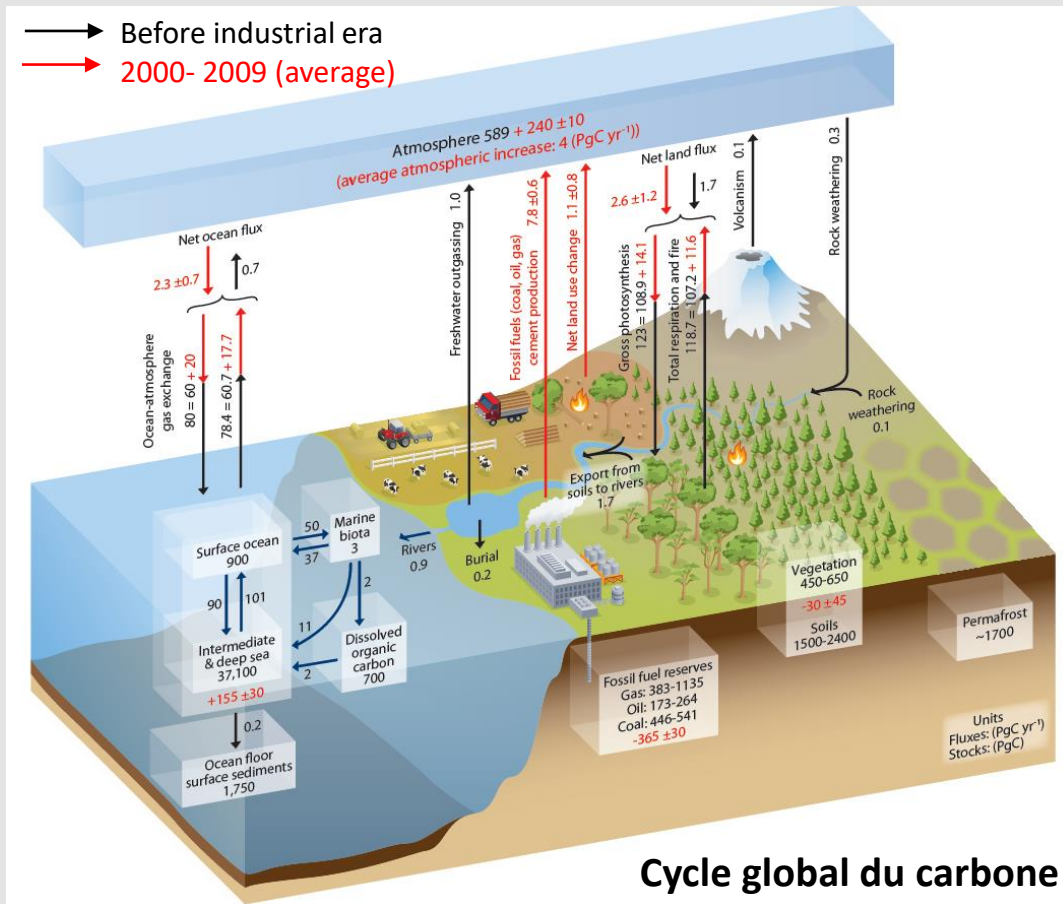


- Augmentation forte et continue depuis 1850
- Stabilisation ces 10 dernières années mais pas de baisse

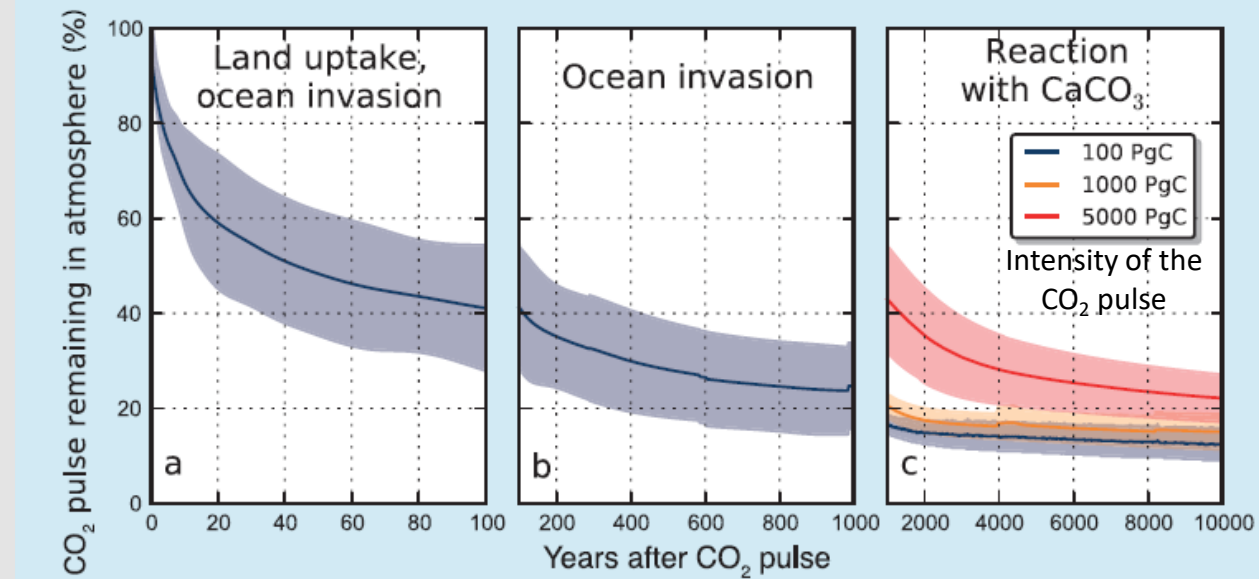


Ref : [ClimateChangeTracker]

Le CO₂ reste très longtemps dans l'atmosphère



- Il n'y AUCUN procédé d'élimination du CO₂ directement dans l'atmosphère
- Le CO₂ peut être capté par les autres réservoirs (la végétation, l'océan, les roches ...)



Percentage of emitted CO₂ remaining in the atmosphere after an instantaneous CO₂ pulse

- Après 100 ans, 40 % du pic de CO₂ émis est toujours présent dans l'atmosphère
- Après 10 000 ans, il en reste encore entre 10 et 25 %

Tous les secteurs émettent des gaz à effet de serre

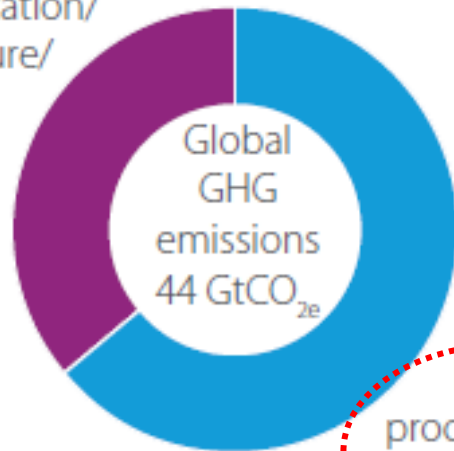
Emissions mondiales de gaz à effet de serre

Ref : [Allwood1]

Dues à l'activité humaine)

= Anthropiques totales

Deforestation/
agriculture/
decay,
36%



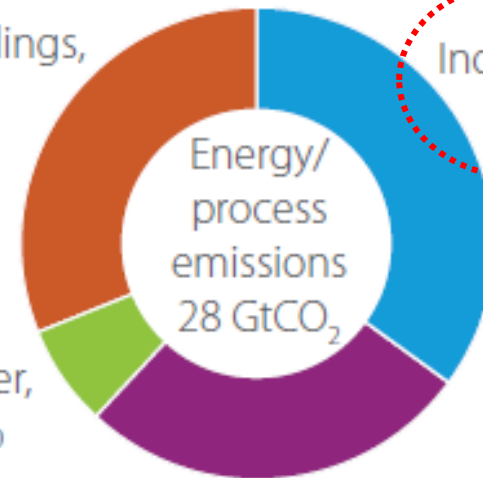
Dues aux énergies fossiles

= Hors agriculture, déforestation

Buildings,
31%

Other,
7%

Transport,
27%



Industrie

Other,
45%

Industrial
carbon
emissions
10 GtCO₂

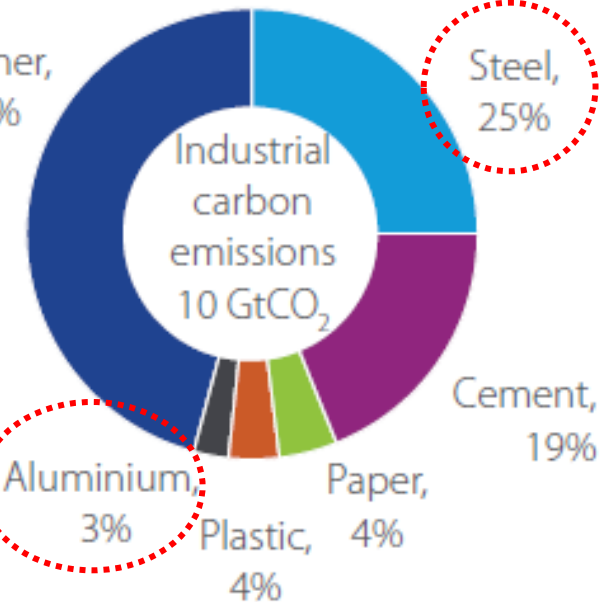
Steel,
25%

Cement,
19%

Aluminium,
3%

Plastic,
4%

Paper,
4%



→ Production des matériaux : 12 %

→ Dont acier : 6 % ,

→ Dont aluminium < 1 %

→ Aviation commerciale : 2 %

Ref : [ICCT, 2018]

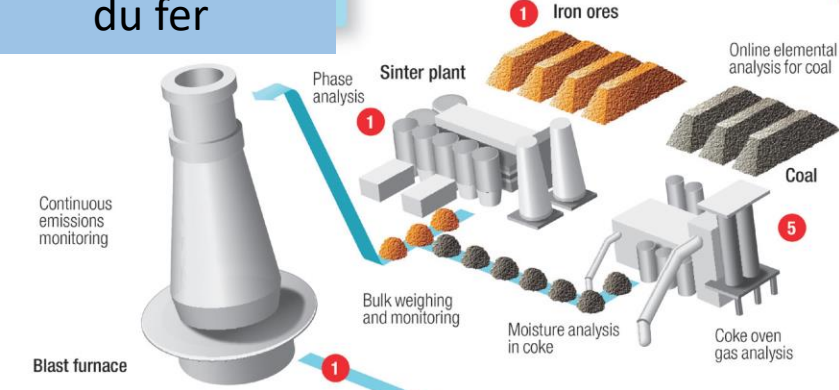
des émissions de GES
anthropiques totales

Sommaire

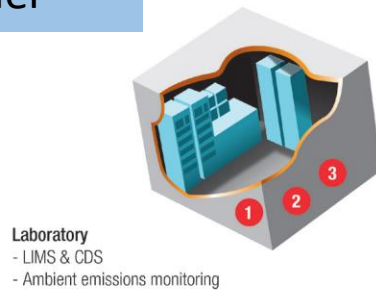
- Introduction
- **Partie 1 : Cycle de vie et recyclage des métaux et alliages**
 - *Exercices de détection de green-washing*
- **Partie 2 : Le recyclage par voie solide**
 - *Présentation du compte Instagram o_mon_labo*
- **Conclusion et ouverture**
 - *Faut-il continuer à balayer les vagues ?*

Elaboration d'un produit en acier

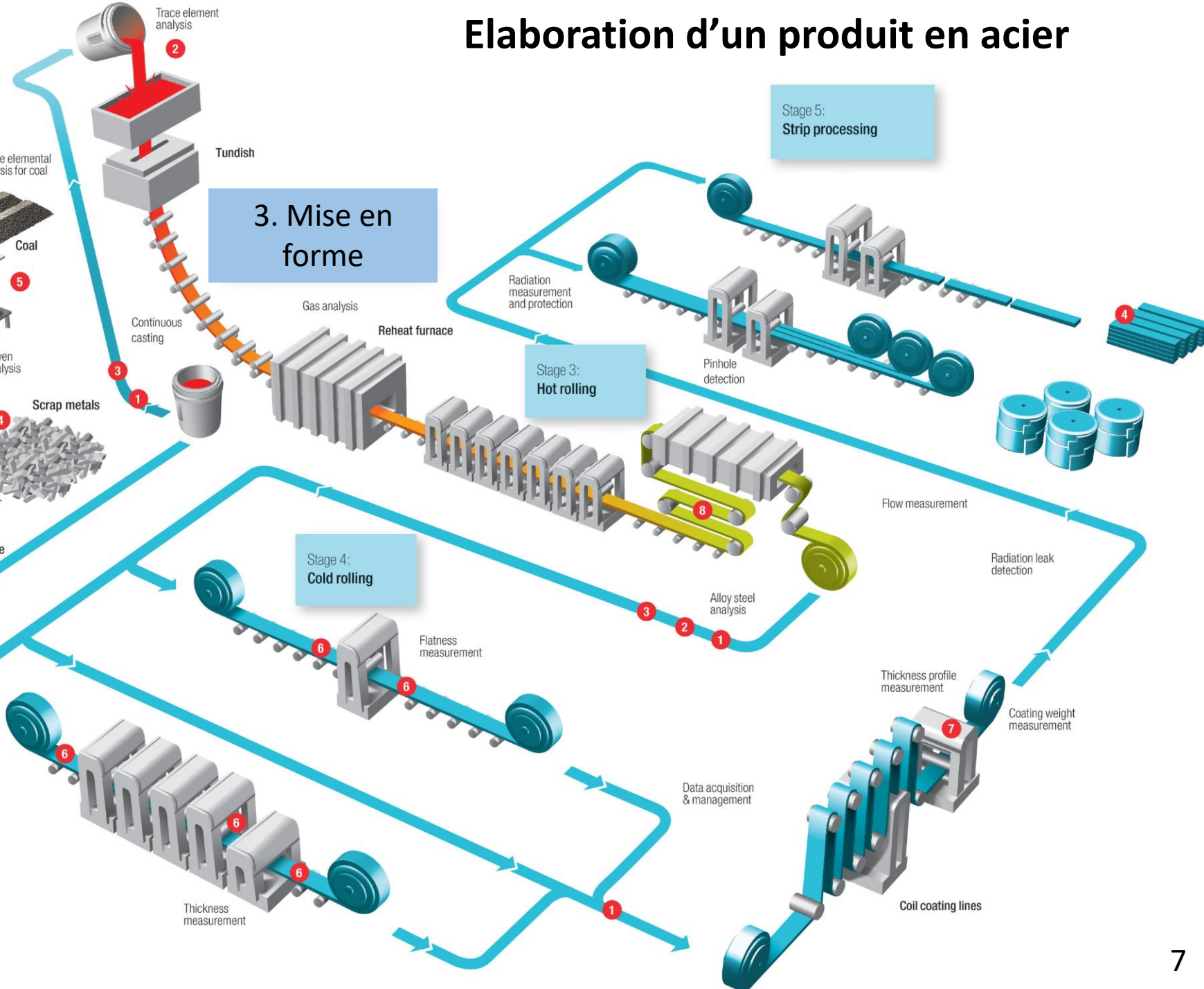
1. Elaboration du fer



2. Elaboration de l'acier



3. Mise en forme



Elaboration d'un produit en acier : Consommation d'énergie et émissions de CO₂

1. Elaboration du fer

85 % de l'énergie consommée

Pour une poutre fabriquée par la filière minerais

E : 16,8 GJ / t d'acier

1,3 tCO₂/t

2. Elaboration de l'acier

Filière ferraille

E : 5,5 GJ / t d'acier

Filière minerais

E : 0,1 GJ / t d'acier

3. Mise en forme

Poutre de construction

E : 3,2 GJ / t d'acier

Porte de voiture

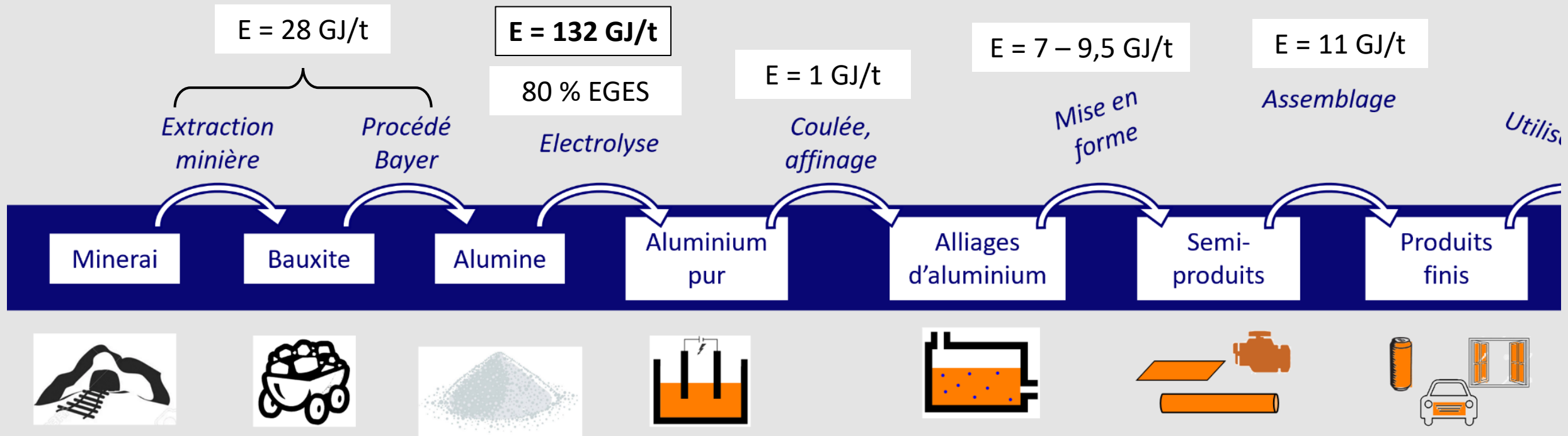
E : 7 GJ / t d'acier

Augmente avec la complexité du produit

Au total, environ
2 tCO₂/t d'acier

E : énergie consommée (en gigajoule par tonne d'acier produit)

Elaboration d'un produit en aluminium : consommation d'énergie



→ Electrolyse : > 75 % de l'énergie totale pour former un produit fini

Au total, $16 \text{ tCO}_{2,\text{eq}} / \text{t Al}$

Ref : [Laurent-Brocq, Techniques de l'Ingénieur, 2023]

Ref : [Allwood-4] pour énergies

E : énergie consommée (en gigajoule par tonne d'aluminium)

Diminution de
l'impact
environnemental

Emissions de CO₂

Détecteur de
green-washing

Hydro REDUXA

one-quarter
of the global
average



4.0 kg
CO₂
per kg Al

Global average
16.7 kg
CO₂
per kg Al

Emissions de CO₂ de l'électrolyse :

- Majoritairement due à la production d'électricité (> 90 %)
- Un peu à cause de la consommation de l'anode en carbone

→ Les émissions de CO₂ dépendent beaucoup du mix électrique du lieu de production de l'aluminium primaire.

Ref : [Hydro]

Pourquoi recycler l'acier ?

1. Elaboration du fer

E : 16,8 GJ / t d'acier

2. Elaboration de l'acier

Filière ferraille

E : 5,5 GJ / t d'acier

Filière minerais

E : 0,1 GJ / t d'acier

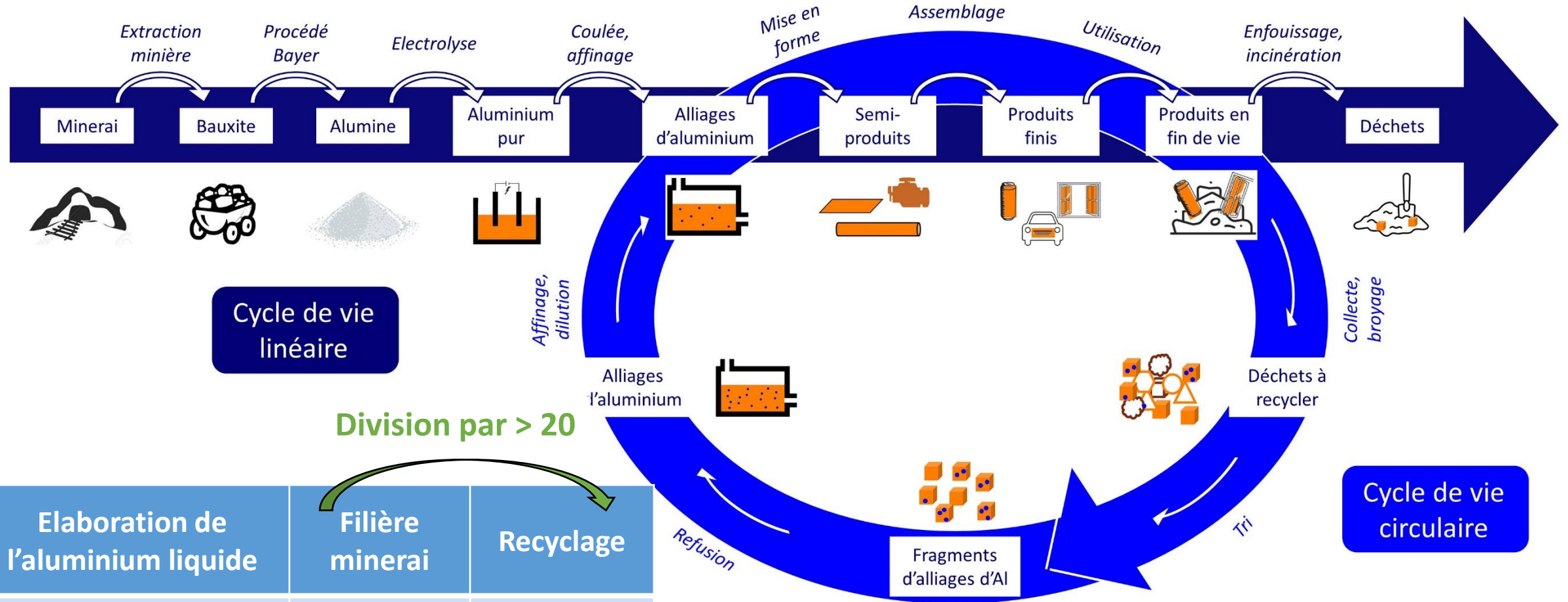
Division par 3

Elaboration de l'acier liquide	Filière minerais	Recyclage
Energie consommée (GJ/t)	16,9	5,5
Emissions de CO ₂ (t CO _{2e} /t)	1,6	0,4

Division par 4

→ Le recyclage des métaux diminue très significativement l'impact environnemental par rapport à la production à partir de minerais

Pourquoi recycler l'aluminium?

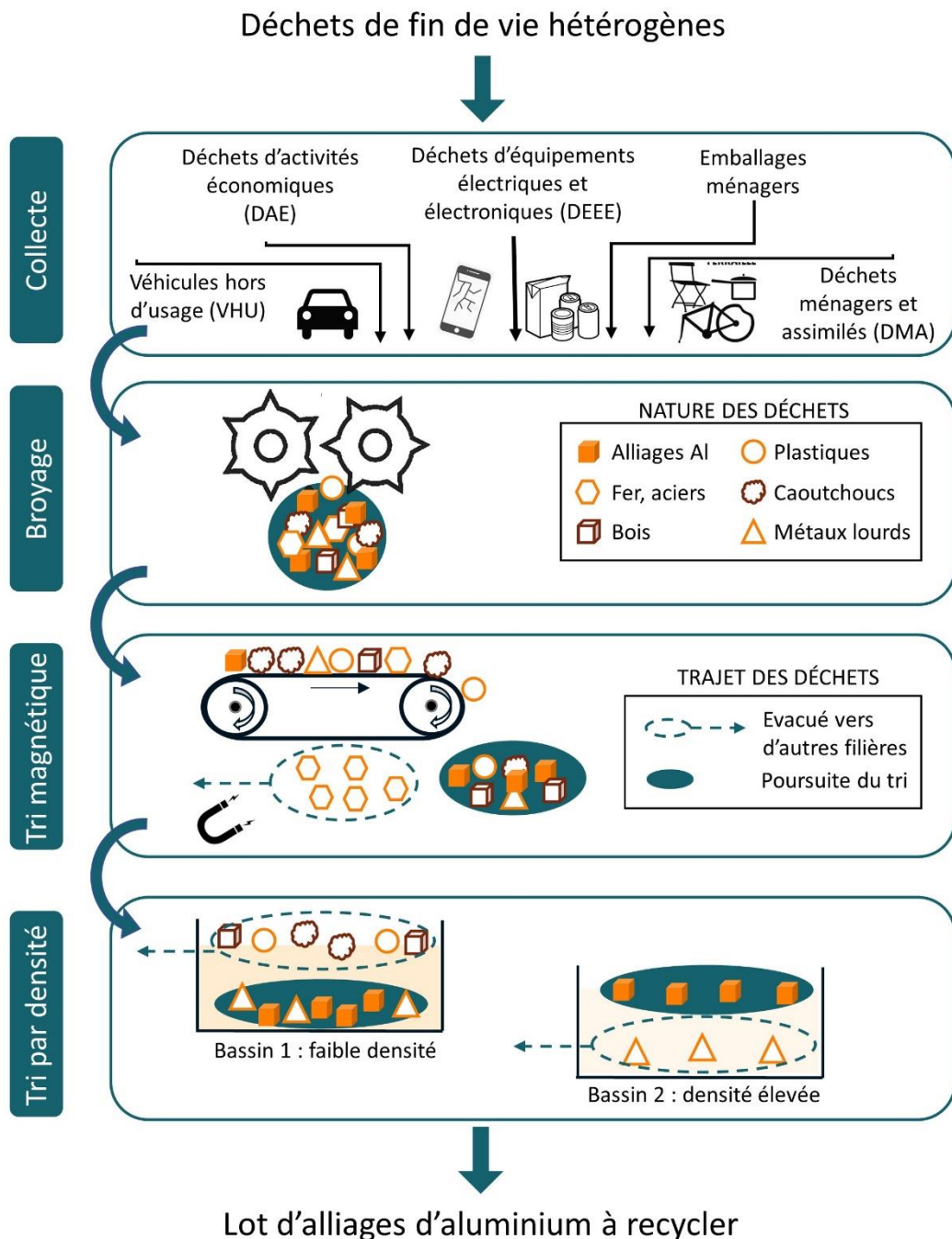


Elaboration de l'aluminium liquide	Filière minerai	Recyclage
Energie consommée (GJ/t)	160	7
Emissions de CO ₂ (t CO _{2e} /t)	15	0,8

Ref : [Laurent-Brocq, 2023]

Les étapes du recyclage

Cas de l'aluminium



- Les flux de matière sont considérables
- Les filières de recyclage sont organisées par famille de matériaux

Re-fusion de l'alliage



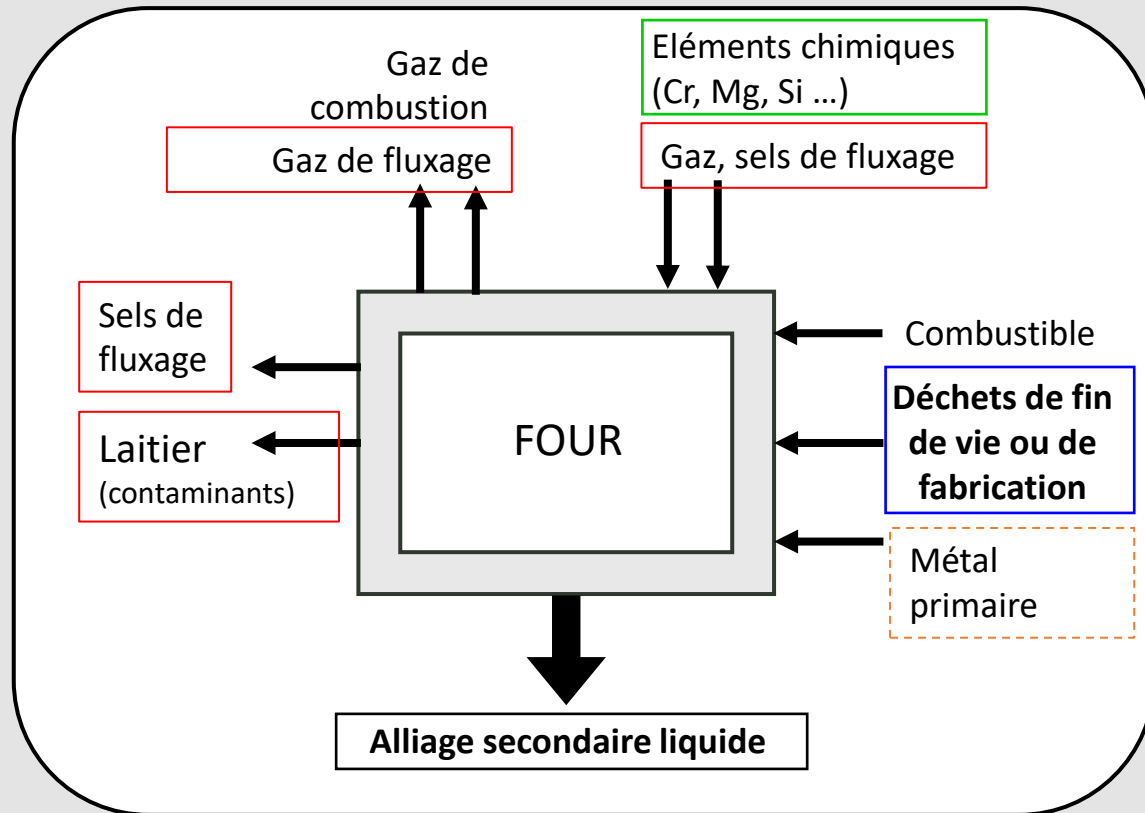
Objectifs de la refusion :

- Mettre les métaux sous forme liquide
- Contrôler la composition chimique

→ A l'issue de la refusion, le cycle de vie linéaire est réintégré : les déchets sont effectivement recyclés

Re-fusion de l'alliage : contrôler la composition

Problème : la composition des lots de déchets est variable (éléments d'alliages, contamination)



1. Sélection des lots de déchets

→ Objectif : se rapprocher de la composition finale souhaitée

2. Ajout d'éléments chimiques

→ Objectif : apporter les éléments d'alliages manquants

3. Evacuation du laitier

→ Objectif : enlever les contaminants

4. Dilution

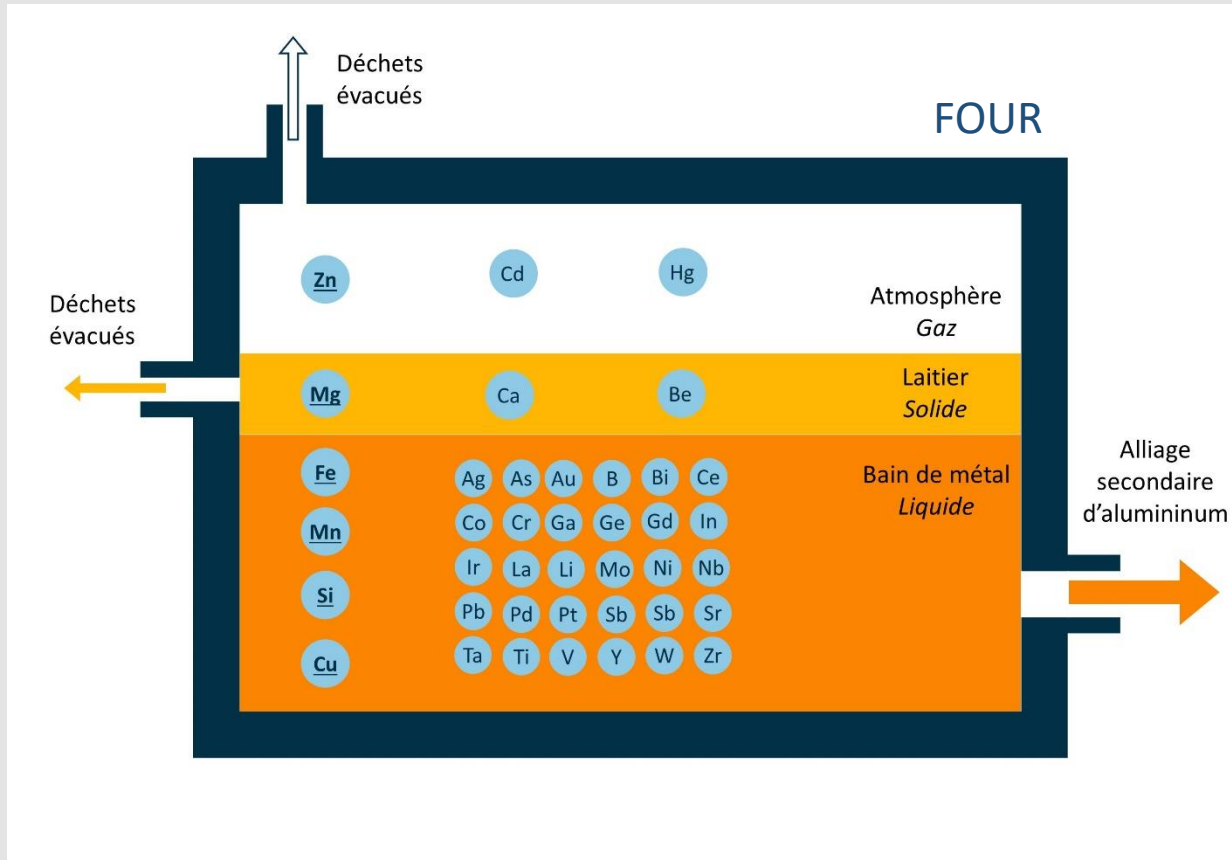
→ Objectif : diminuer la concentration des contaminants

5. Sous-cyclage

→ Objectif : trouver une application correspondant aux propriétés dégradées de l'alliage recyclé

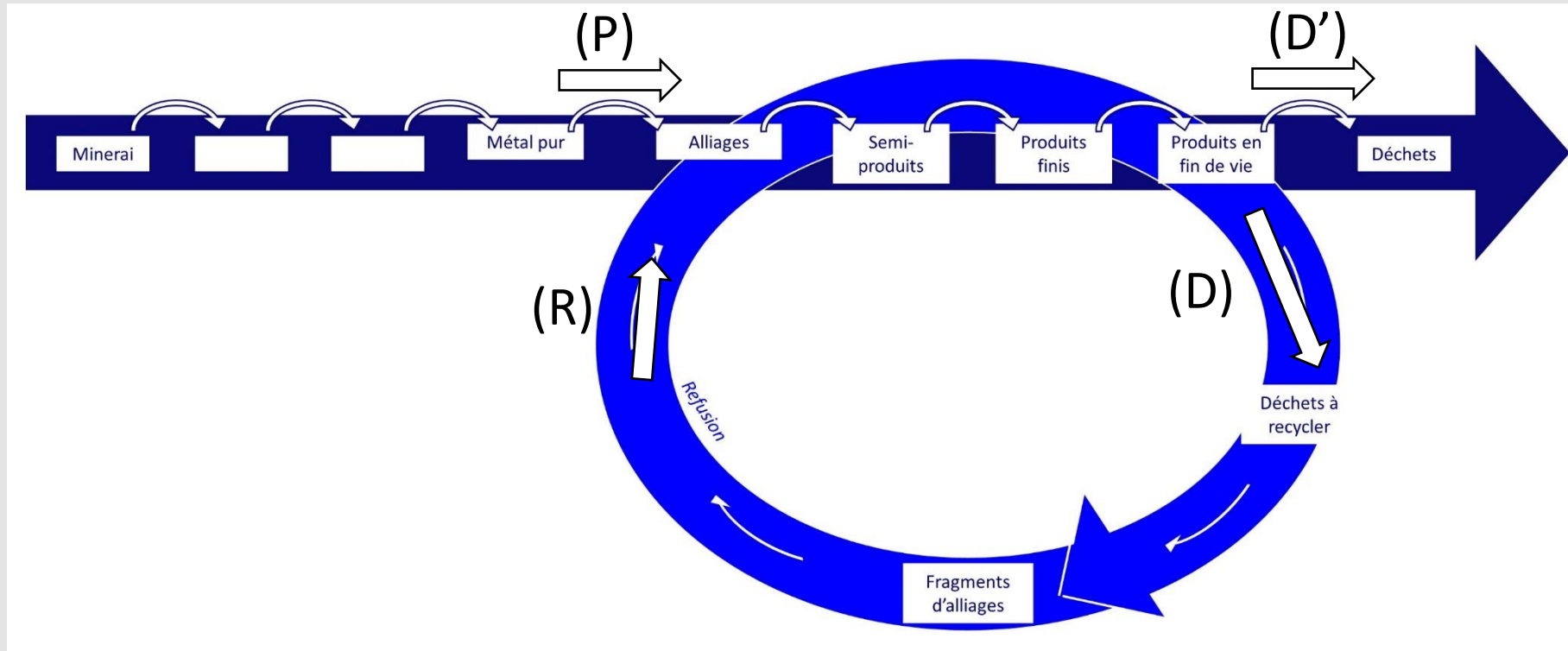
Que deviennent les éléments d'alliages pendant la re-fusion ?

Exemple des alliages d'aluminium



- La répartition des éléments chimiques entre les 3 phases dépend de l'équilibre thermodynamique
→ On peut l'influencer en ajoutant des gaz ou des sels, en modifiant la température
- Les éléments chimiques qui restent piégés dans le bain de métal peuvent être :
 - Souhaités (tant mieux)
 - Neutres sur les propriétés (leur valeur intrinsèque est perdue)
 - Néfastes (il faut alors diluer et/ou sous-cycler)

Taux de recyclage : définitions



Taux de recyclage en fin de vie

$$\tau_{recyclage} = R / (D + D')$$

End-of-life recycling rate

→ Acier : de 52 à 70 %

Taux d'incorporation de métal recyclé :

$$\tau_{incorporation} = (R) / (R + P)$$

Recycled content

→ Acier : < 40 %



Green-washing



Détecteur de
green-washing



**LE SYNDICAT NATIONAL DES FABRICANTS DE BOÎTES,
EMBALLAGES ET BOUCHAGES MÉTALLIQUES**

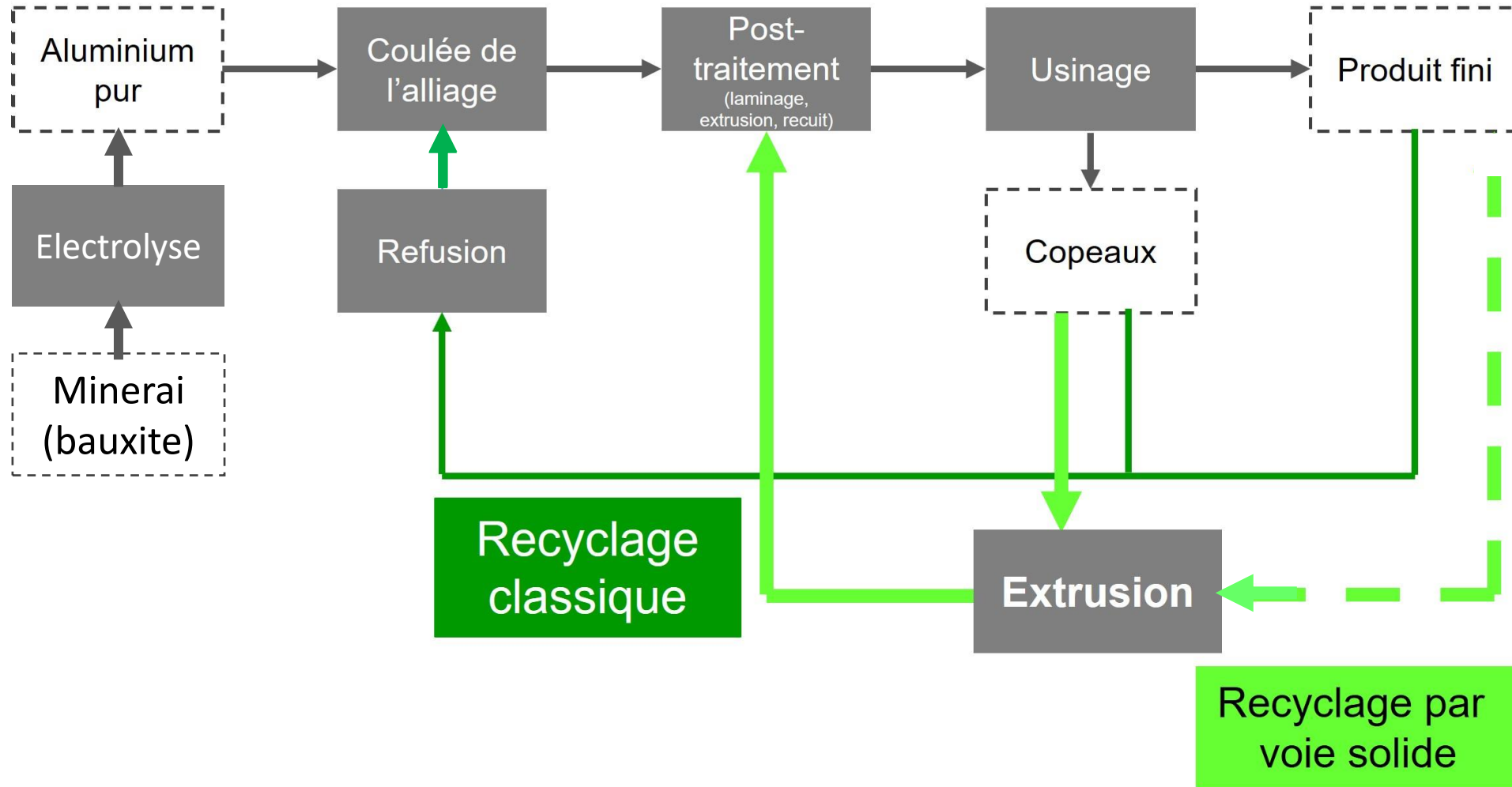
Les pistes pour améliorer le recyclage

Objectif	Mesures	Levier d'action
Augmenter le taux de collecte des déchets	- Simplifier les consignes - Communication	Evolution socio-économique
Améliorer le tri des familles de matériaux	- Généraliser l'utilisation des meilleures techniques (pyrolyse, overband)	Investissement financier
Trier les différentes familles d'alliages d'Al	- Déployer les nouvelles techniques de tri (LIBS, SFX)	Investissement financier
Diminuer le taux d'impuretés	- Utiliser de nouvelles techniques de traitement du métal liquide	R & D
Diminuer la consommation d'énergie du recyclage	- Optimiser les fours de refusion - Développer le recyclage par voie solide	Investissement financier R&D
Limiter le sous-cyclage et la dilution	- Concevoir des nuances plus tolérantes aux impuretés - Réduire le nombre de nuances d'alliages utilisées	R&D Evolution socio-économique

Sommaire

- Introduction
- **Partie 1 : Cycle de vie et recyclage des métaux et alliages**
 - *Exercices de détection de green-washing*
- **Partie 2 : Le recyclage par voie solide**
 - *Présentation du compte Instagram o_mon_labo*
- **Conclusion et ouverture**
 - *Faut-il continuer à balayer les vagues ?*

Le recyclage des alliages d'aluminium



Comparaison des deux méthodes de recyclage

Recyclage conventionnel : refusion → Voie liquide



Hydro®, fonderie de Lucé, visite du 30/05/2022

16 à 19 GJ/tonne*

Dilution/ajout d'éléments

Laitier

CONSOMMATION D'ÉNERGIE

COMPOSITION

IMPURETÉS

Nouvelle méthode : extrusion à chaud → Voie solide



TU Dortmund, Allemagne

5 à 6 GJ/tonne*

Pas d'ajustement

??

Chutes
d'usinage

*[Tekkaya, 2009, J. Mat Proc]

Démarche et objectif

- Recyclage de copeaux d'usinage par voie solide
- Etude de l'alliage 6060 : Al – 0,44Si – 0,4 Mg – 0,2 Fe % mass.

- Quantification et localisation de l'oxygène
- Effet sur les propriétés mécaniques

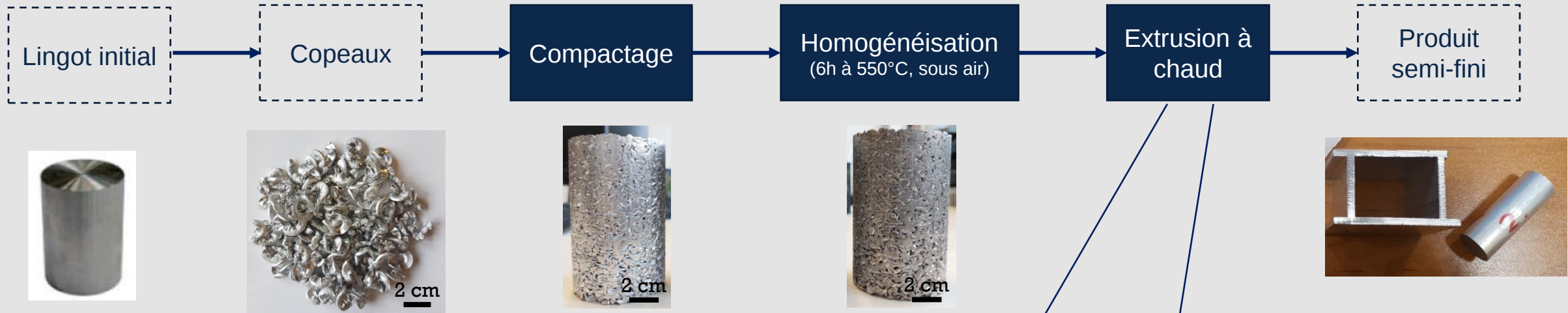
tu technische universität
dortmund

IR
CP Institut
de Recherche
de Chimie Paris

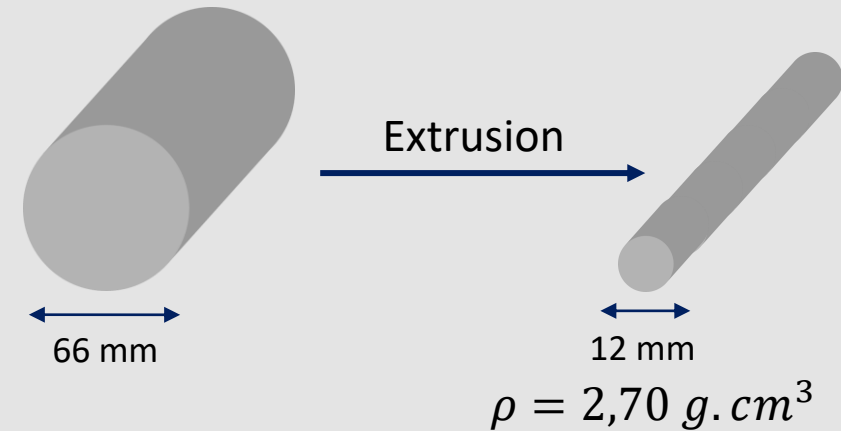
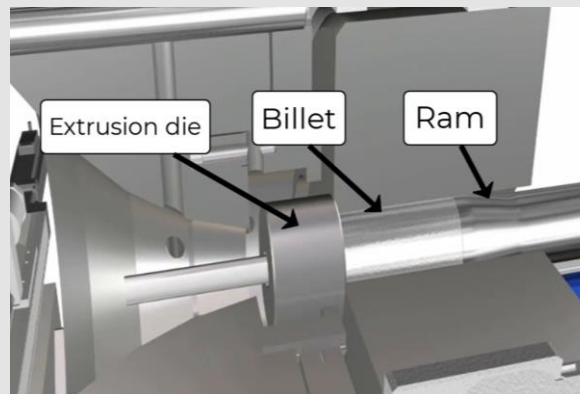
L. Lilensten



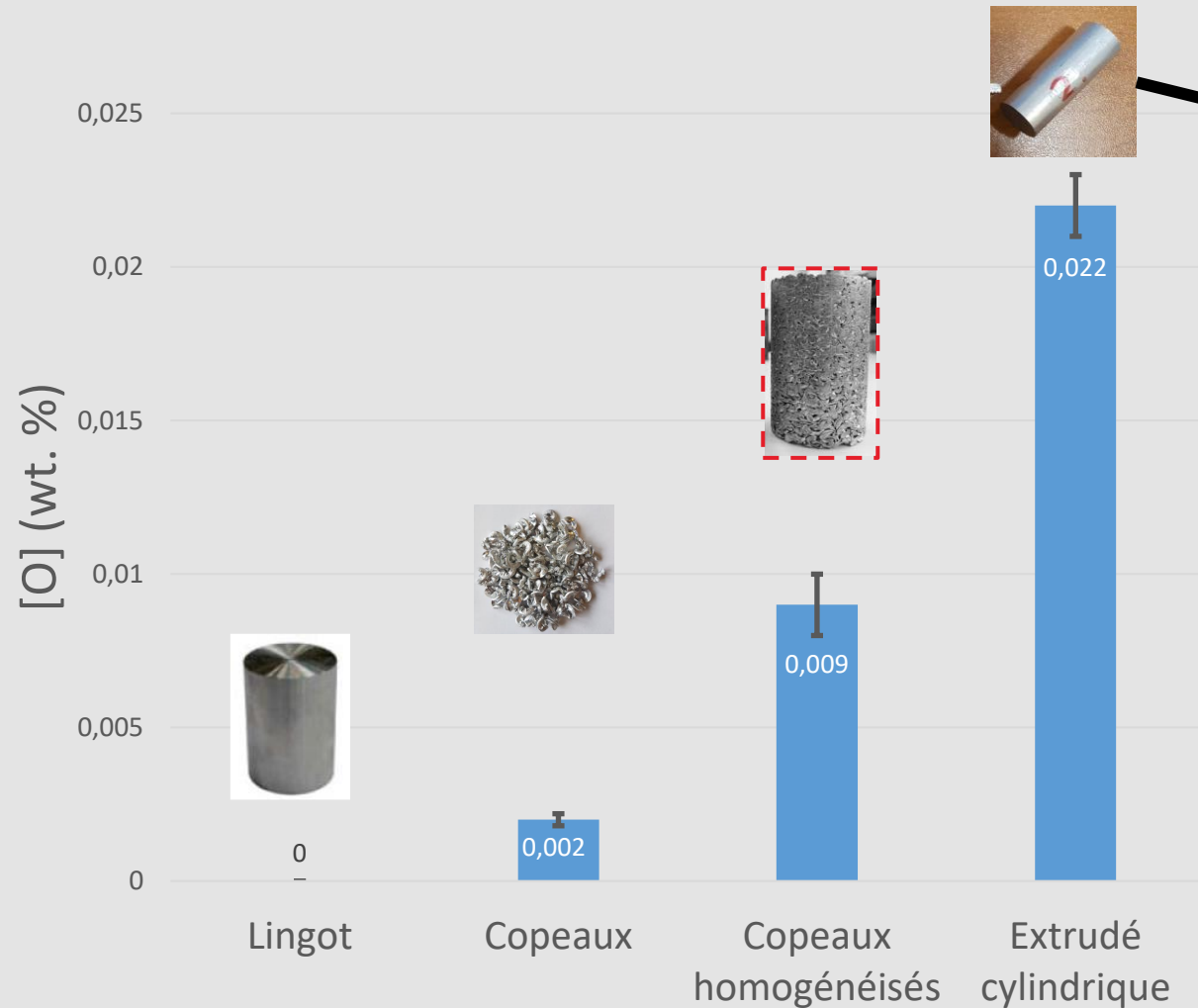
Elaboration des échantillons



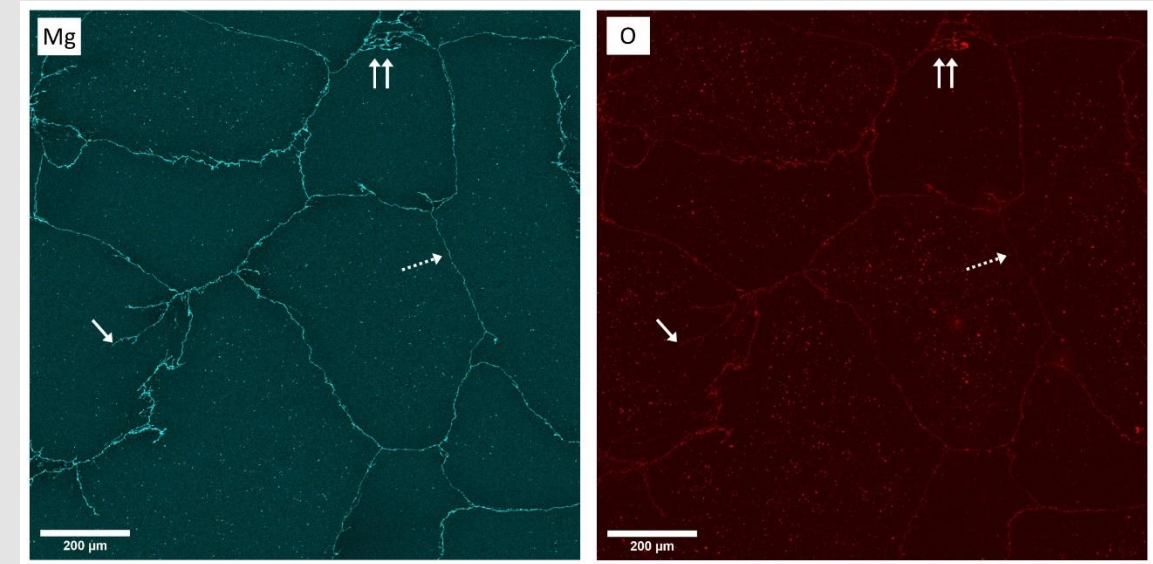
$T_{\text{die}} = 450^{\circ}\text{C}$
 $T_{\text{billet}} = 550^{\circ}\text{C}$
Ratio d'extrusion = 30



Quantification et localisation de l'oxygène



FRIR : fusion réductrice à absorption infrarouge



Microsonde de Castaing

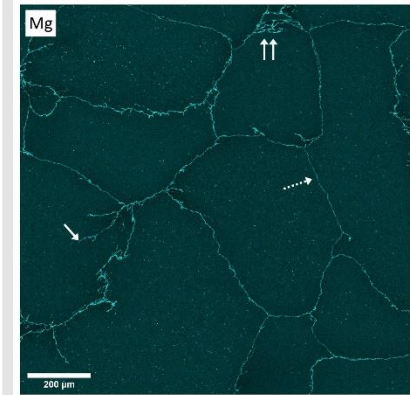
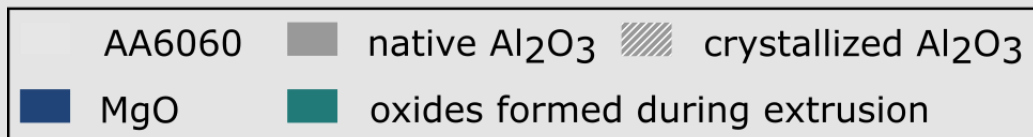
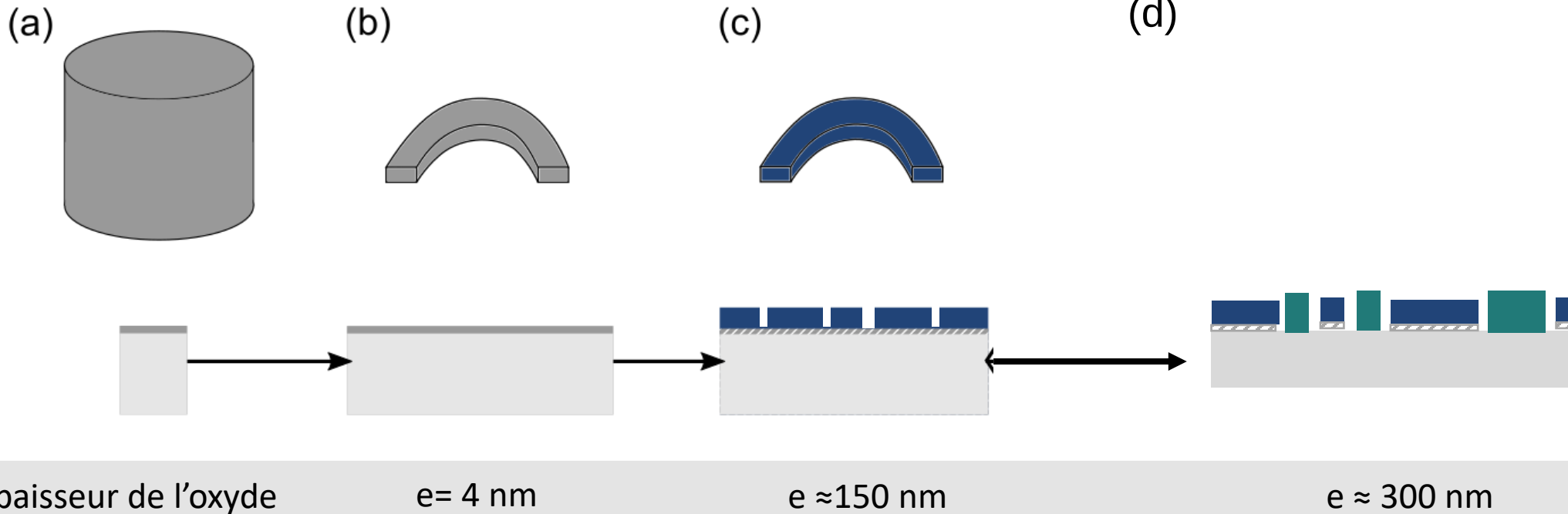
Ref : [Laurent-Brocq, 2023, Materialia]

Mécanisme d'oxydation

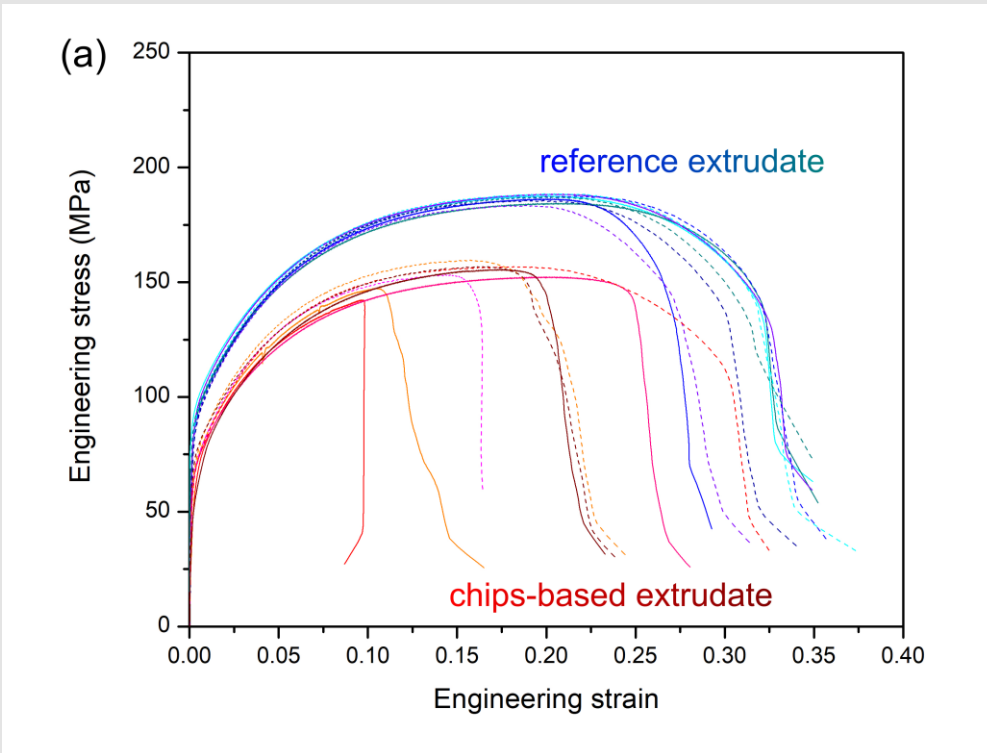
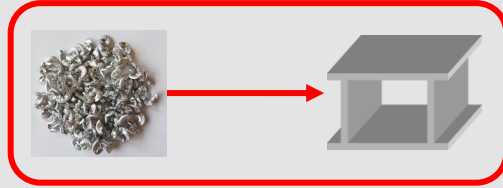
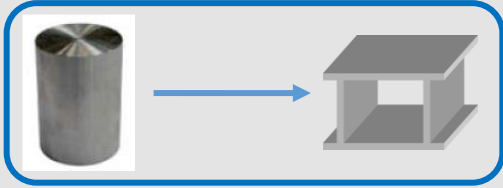
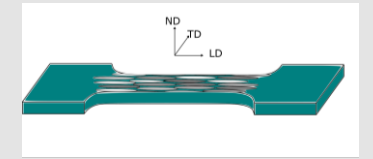
Usinage

Homogénéisation
(6h à 550°C, sous air)

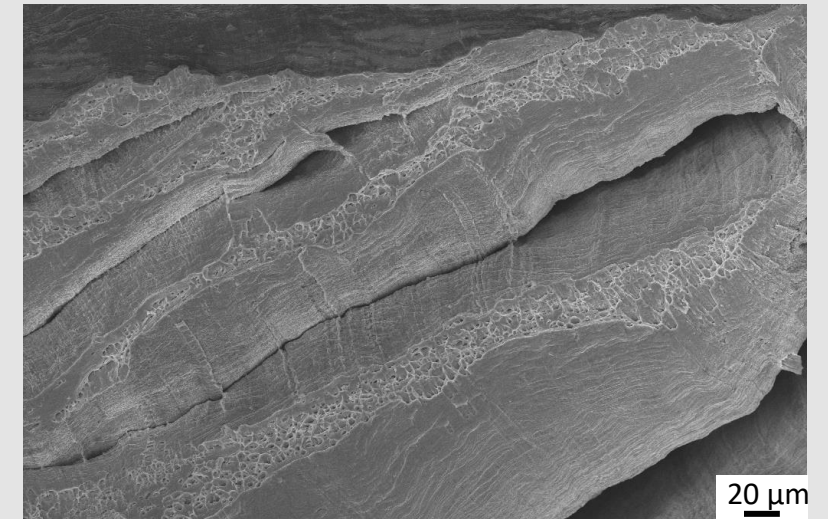
Extrusion à
chaud



Propriétés mécaniques



Essai mécanique : traction



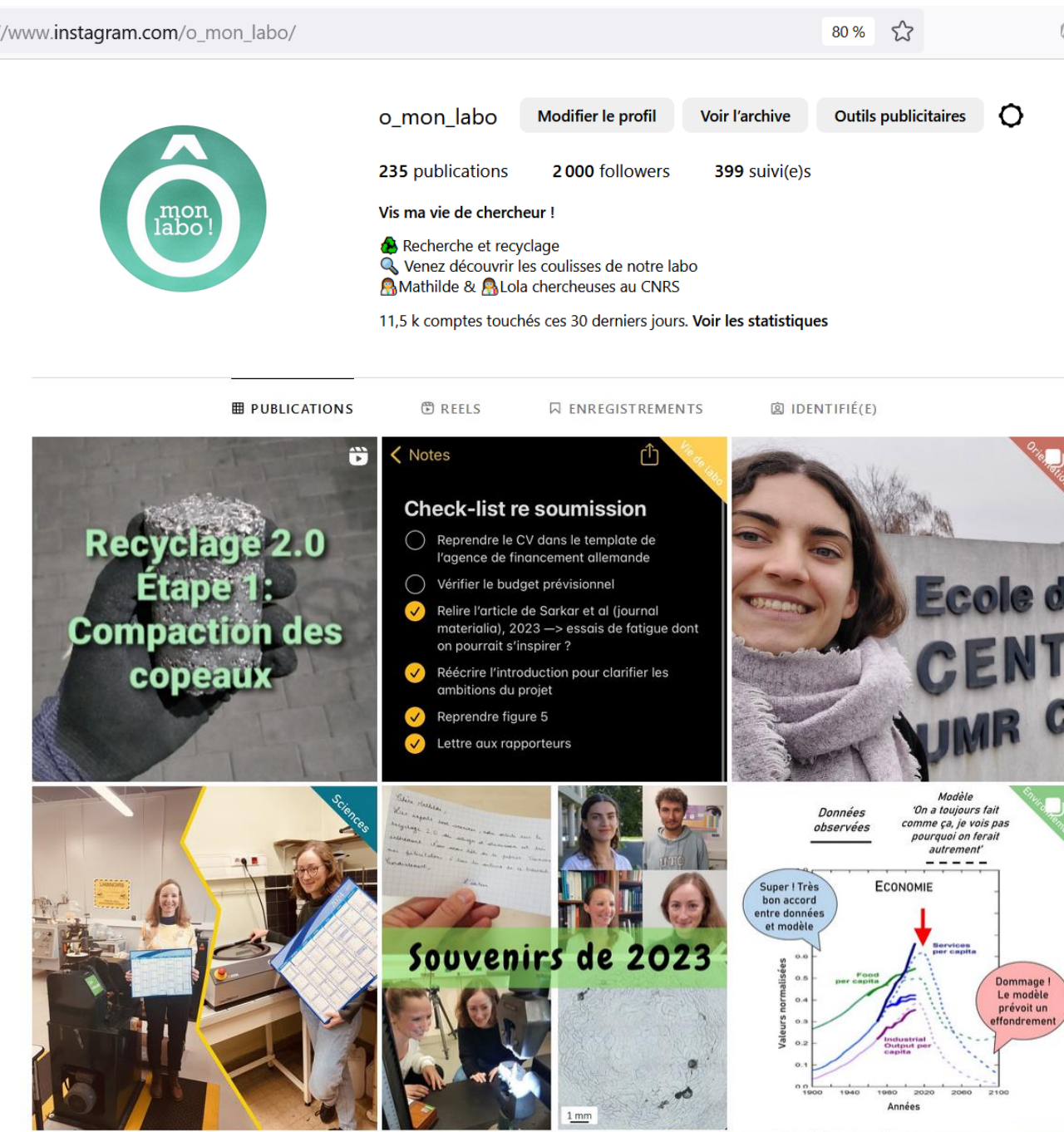
Faciès de rupture, microscope électronique à balayage

Bilan

- Le recyclage par voie solide divise par 3 l'énergie consommée par rapport au recyclage conventionnel (par voie liquide) et est maîtrisé à l'échelle du laboratoire
- L'oxydation initiale des copeaux augmente pendant le procédé
- L'oxygène interagit avec les éléments d'alliages (Mg)
- Les propriétés mécaniques sont proches de celles de l'alliage de référence mais anisotropes et avec une perte de ductilité

Perspectives

- Etudier les cinétiques d'oxydation et adapter les conditions d'extrusion
- Réaliser des recuits de précipitation
- Mesurer d'autres propriétés mécaniques (cisaillement, fatigue ...) → collab avec le GeM, Centrale Nantes
- Analyser le cycle de vie → collab avec le Laboratoire Navier, Ecole des Ponts et Chaussées



Piste R&D : le recyclage par voie solide



o_mon_labo

Suivez notre projet de recherche sur le recyclage d'alliages d'aluminium

- vie de labo
- sciences
- environnement
- orientation

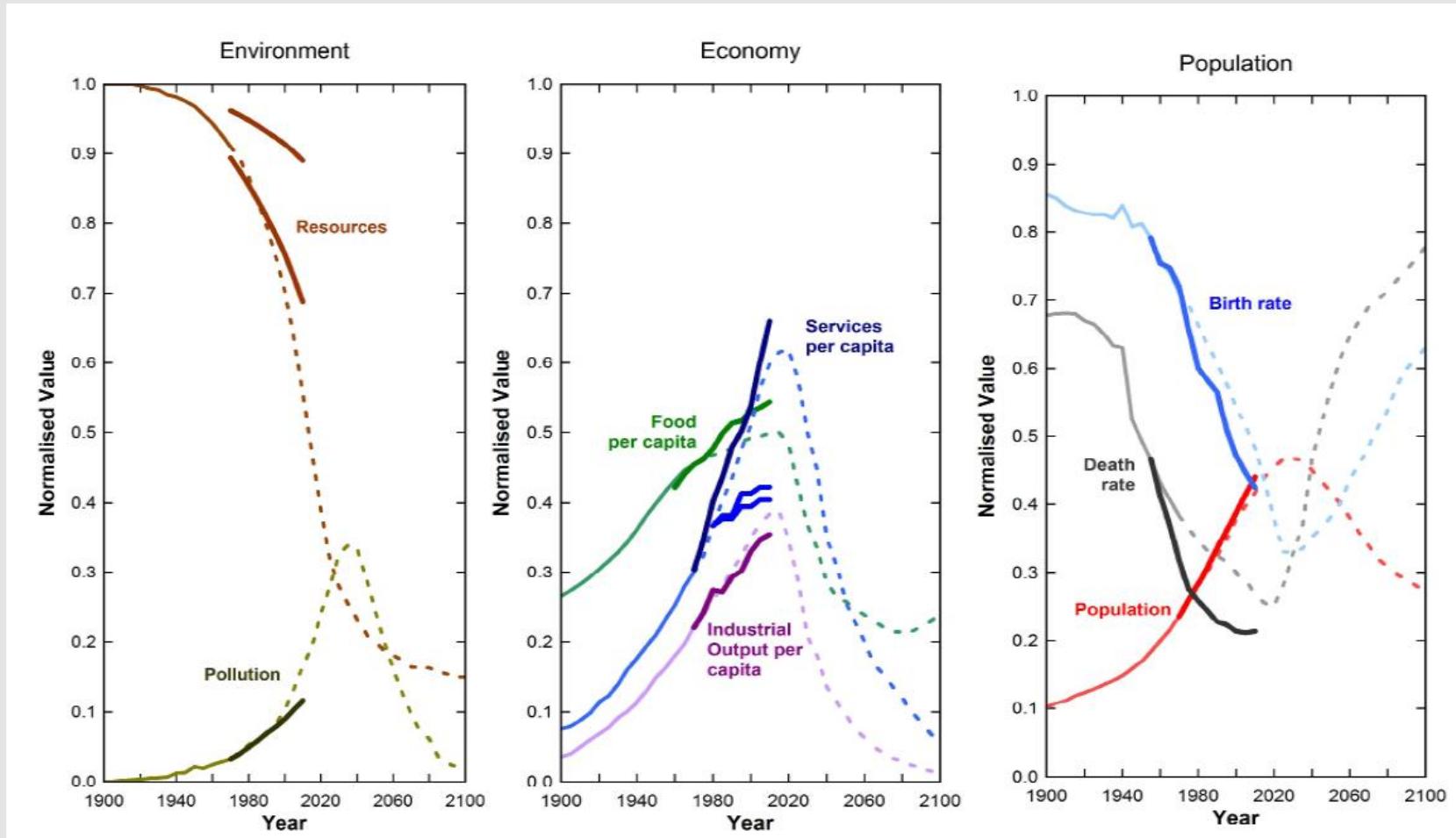
Sommaire

- Introduction
- **Partie 1 : Cycle de vie et recyclage des métaux et alliages**
 - *Exercices de détection de green-washing*
- **Partie 2 : Le recyclage par voie solide**
 - *Présentation du compte Instagram o_mon_labo*
- **Conclusion et ouverture**
 - *Faut-il continuer à balayer les vagues ?*

S'il n'y avait que 3 choses à retenir

- Produire un métal consomme des ressources naturelles, beaucoup d'énergie et émet beaucoup de CO₂
- Recycler un métal diminue très fortement l'impact environnemental (par rapport à une production à partir de minerai)
- Le recyclage des métaux est incomplet et imparfait. Des améliorations sont possibles (comme le recyclage par voie solide)

Cela va-t-il suffire ? Le scénario 'Business as usual'



Lignes pointillées : modèle 'Business as usual', proposé en 1972, par Meadows *et al.*
(*'The Limits to Growth'*)

Traits continus : données historiques (mises à jour en 2014), par G. Turner

- Les données jusqu'en 2014 suivent le modèle 'Business as usual' proposé en 1972 et qui prédit un effondrement dans les années 2020
- Effondrement = diminution brutale des biens et revenus par personne, de la population



Claude Cattelain : *Repousser inlassablement les vagues à l'assaut du rivage* (2016)

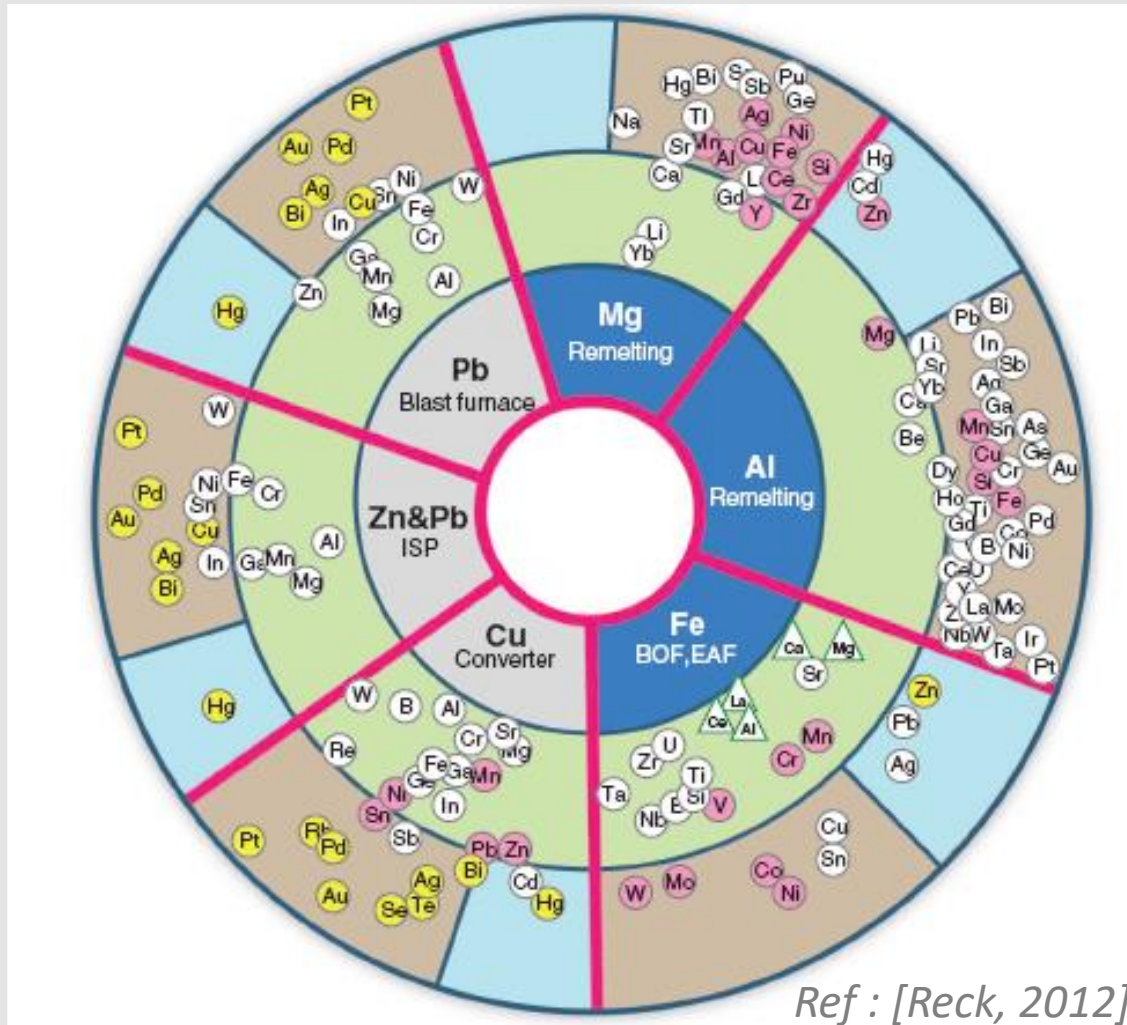
http://www.claudecattelain.com/cc_videos_fabrica_brighton_day_10_reloaded.html

Références

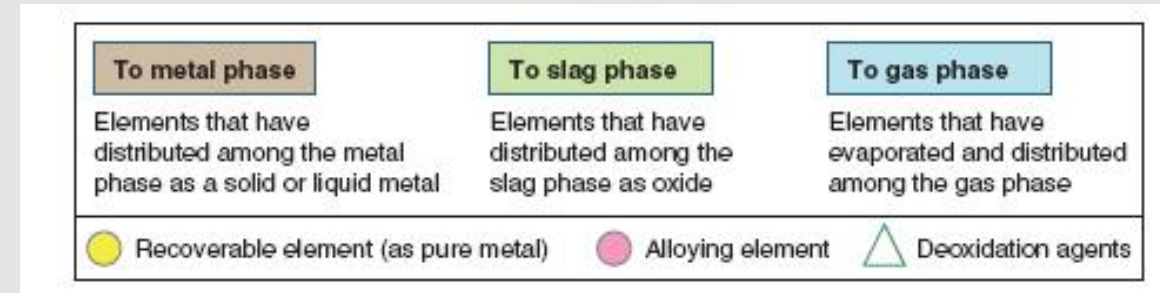
- [Allwood1] : livre « Sustainable materials: with both eyes opened » by Allwood, J.M. and Cullen, J.M. ; fig 2.1, p. 11. (Consultable en ligne : <http://www.withbotheyesopen.com/read.php>)
- [Allwood-4]: [Allwood1], fig 4.2 p53 et fig 5.2 p 74-75
- [ClimateChangeTracker]: <https://climatechangetracker.org/igcc> , consulté en octobre 2023, par 50 scientifiques internationaux, basé sur les rapports du GIEC
- [ICCT, 2018] « CO2 emissions from commercial aviation, 2018 » , 2019 by Graver et al. from the International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/publication/co2-emissions-from-commercial-aviation-2018/>
- [GIEC-2] « 2013: Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change”, https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter06_FINAL.pdf
- [Hydro] : <https://www.hydro.com/en/aluminium/products/low-carbon-and-recycled-aluminium/low-carbon-aluminium/hydro-reduxa/> consulté le 20/10/2023
- [Hydro2] : visite de la fonderie de Lucé, en juin 2022
- [Laurent-Brocq, 2023] : Laurent-Brocq, M. and L. Lilensten, *Récupération et recyclage de l'aluminium - Stratégie*. Techniques de l'ingénieur, 2023. **M2345 V2**: p. 1-17.
- [Laurent-Brocq,2023, Materialia] : Laurent-Brocq, M., Lilensten, L., Pinot, C., Schulze, A., Duchaussoy, A., Bourgon, J., Leroy, E., and Tekkaya, A.E., *Solid state recycling of aluminium chips: Multi-technique characterization and analysis of oxidation*. Materialia, **2023**. 31: p. 101864.
- [Turner, 2014] : Turner, G. (2014) 'Is Global Collapse Imminent?', MSSI Research Paper No. 4, Melbourne Sustainable Society Institute, The University of Melbourne
https://www.researchgate.net/publication/267751719_Is_Global_Collapse_Imminent_An_Updated_Comparison_of_The_Limits_to_Growth_with_Historical_Data#fullTextFileContent
- [UNEP-1] : “Recycling rates of metals, a status report”, UNEP (United Nations Environment Programme”, 2011, figure 3
- [UNEP-2] : [UNEP-1], figure 4
- [Tekkaya, 2009] : Tekkaya, A.E., Schikorra, M., Becker, D., Biermann, D., Hammer, N., and Pantke, K., *Hot profile extrusion of AA-6060 aluminum chips*. Journal of Materials Processing Technology, **2009**. 209(7): p. 3343-3350.

Que deviennent les éléments d'alliages pendant la re-fusion ? (2)

Les autres familles d'alliages métalliques



BOF : basic oxygen furnace, EAF : electric arc furnace, ISP : imperial smelting process. Slag : laitier



- La situation est variable selon les familles d'alliages :
→ Critique pour Al (quasiment tous les éléments restent dans le métal liquide)
- Dans tous les cas, certains éléments d'alliages restent dans le métal liquide
- La complexité chimique (variété d'éléments d'alliages, nombre de nuances ...) limite l'efficacité du recyclage.

Cycle de vie des métaux : bilan

- Procédés de production multi-étapes avec une ramification importante au cours du cycle de vie (du minerai au produit final)
- Flux de matières très important au niveau mondial (en 2022) :
 - 2 milliards / 50 millions de tonnes par an pour l'acier / l'aluminium
- La production d'alliage primaire est très émettrice de CO₂
 - 2 / 16 t CO_{2,eq}/tonne d'acier / d'aluminium produit
 - L'étape la plus consommatrice en énergie et la plus émettrice de CO₂ est la transformation de l'oxyde en métal

Recyclage : bilan (1)

- Le recyclage des métaux diminue fortement l'impact environnemental par rapport à la production de métal issu du minerai.
 - L'étape de transformation de l'oxyde en métal est évitée
 - Division par 3 / 20 de la consommation d'énergie pour l'acier / l'aluminium
- Les étapes du recyclage sont :
 - La collecte, le broyage, le tri par famille de matériaux, la re-fusion (ou pyro/hydro-métallurgie)
 - Ensuite le métal recyclé ré-intègre le cycle de vie linéaire
- Contrôler la composition (contaminants, éléments d'alliages) est une difficulté majeure du recyclage des métaux. Les leviers sont :
 - Un tri des déchets de qualité
 - Les traitements pendant la re-fusion (ajouts d'éléments, évacuation du laitier)
 - La dilution pendant la re-fusion (ajout de métal primaire)
 - Le sous-cyclage (utilisation pour une application correspondant aux propriétés dégradées de l'alliages recyclé)

Recyclage : bilan (2)

- Il existe plusieurs indicateurs pour décrire l'efficacité du recyclage
 - Le taux de recyclage en fin de vie (métal effectivement recyclé / métal en fin de vie) :
 - rend compte de l'efficacité globale du processus de recyclage
 - > 50 % pour les métaux communs (Fe, Al ...) mais très faible pour certains métaux
 - Le taux d'incorporation de matière recyclée (métal effectivement recyclé/ métal produit) :
 - Dépend de l'efficacité du recyclage et de la demande en métal
 - Actuellement, la demande en métaux étant croissante, les taux d'incorporation sont souvent <50 %.
- Les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) :
 - Sont souvent toxiques, en volume croissant, représentent une ressource (« mines urbaines ») → fort intérêt à recycler
 - MAIS en réalité sont très peu recyclés car la collecte est peu efficace, les produits sont très complexes
 - Nécessitent des techniques de recyclage spécifiques (pyrométallurgie, hydrométallurgie)

Opportunités pour le futur : bilan

Pour diminuer très significativement l'impact environnemental de la production des métaux et alliages :

- Améliorer le recyclage qui est actuellement incomplet (consignes de collecte, généralisation des meilleures pratiques, nouvelles techniques de tri, recyclage par voie solide, évolution des nuances d'alliages...)
- Diminuer le besoin métal qui est pour le moment croissant (amélioration des performances, éco-sélection, low-tech et sobriété ...)
- Développer de nouvelles méthodes de production du métal primaire (réduction directe du fer, électrolyse de l'aluminium avec une anode inerte ...)
- Etre très créatif