

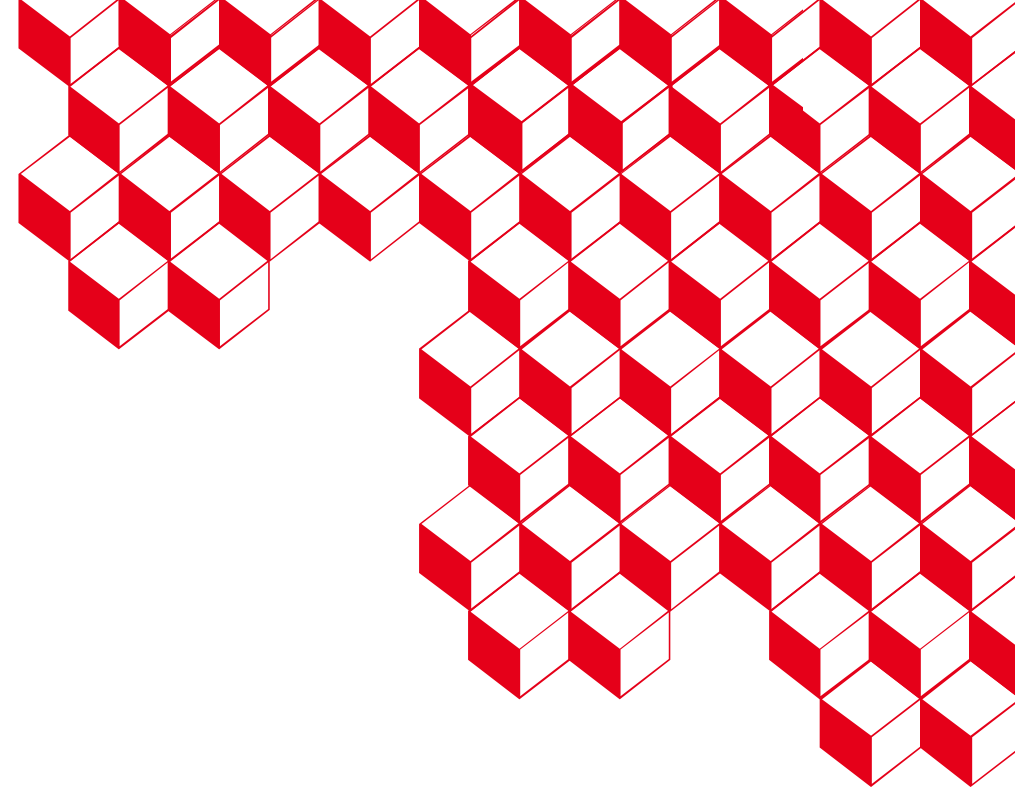


Hydrométallurgie & économie circulaire : une chimie repensée

Philippe Prené, CEA, Directeur de l'Institut des Sciences et technologies pour une Economie Circulaire des énergies bas-carbone (ISEC)

5 décembre 2022

2^{èmes} Rencontres académie-industrie du CNC : le recyclage chimique en science des matériaux : vers une économie circulaire

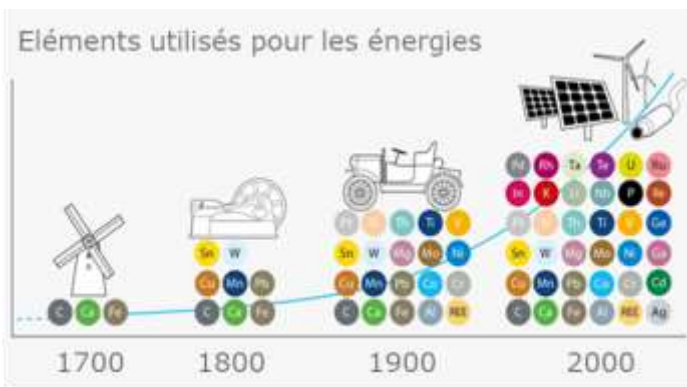
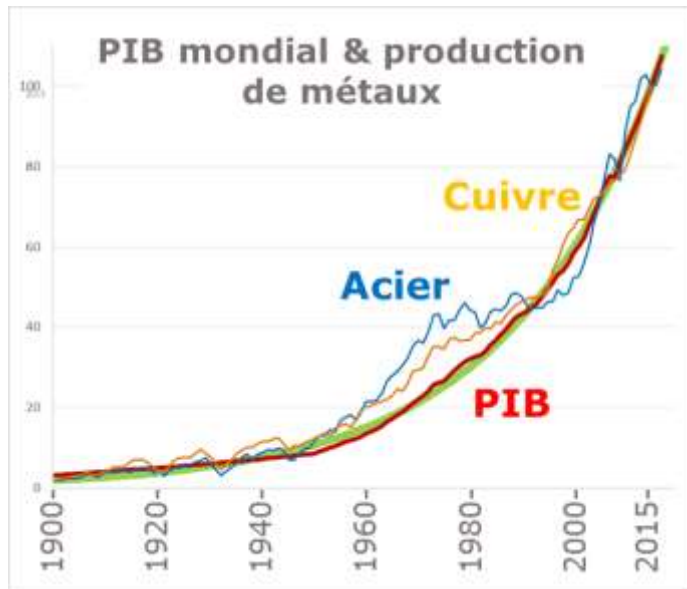


Plan

- Matériaux & économie circulaire
- Hydrométallurgie & économie circulaire
- Conclusions

Approvisionnement des matières : enjeux stratégiques & géopolitiques

https://lapenseecologique.com/author/fgrosse/?print=print-search



► **Croissance exponentielle** des besoins en matières & métaux

► **Forte dépendance** de l'Europe à la Chine (44% des approvisionnements)



Intensifier le recyclage des matières :

- Réduire la dépendance, pas gagner l'indépendance
- Etre en capacité d'accepter un large spectre de matières à recycler & en quantité
- Evolutions technologiques
⇒ inclure une stratégie agile en tête de procédé

Intensifier la production primaire :

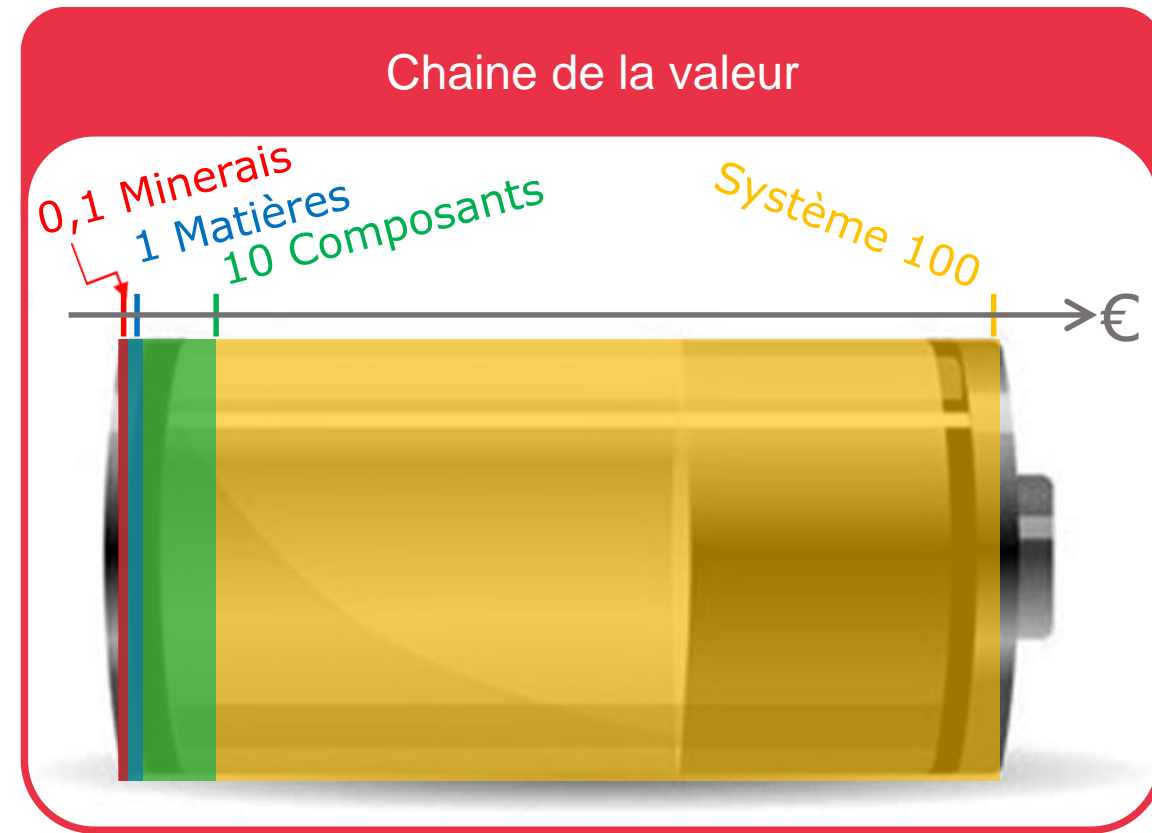
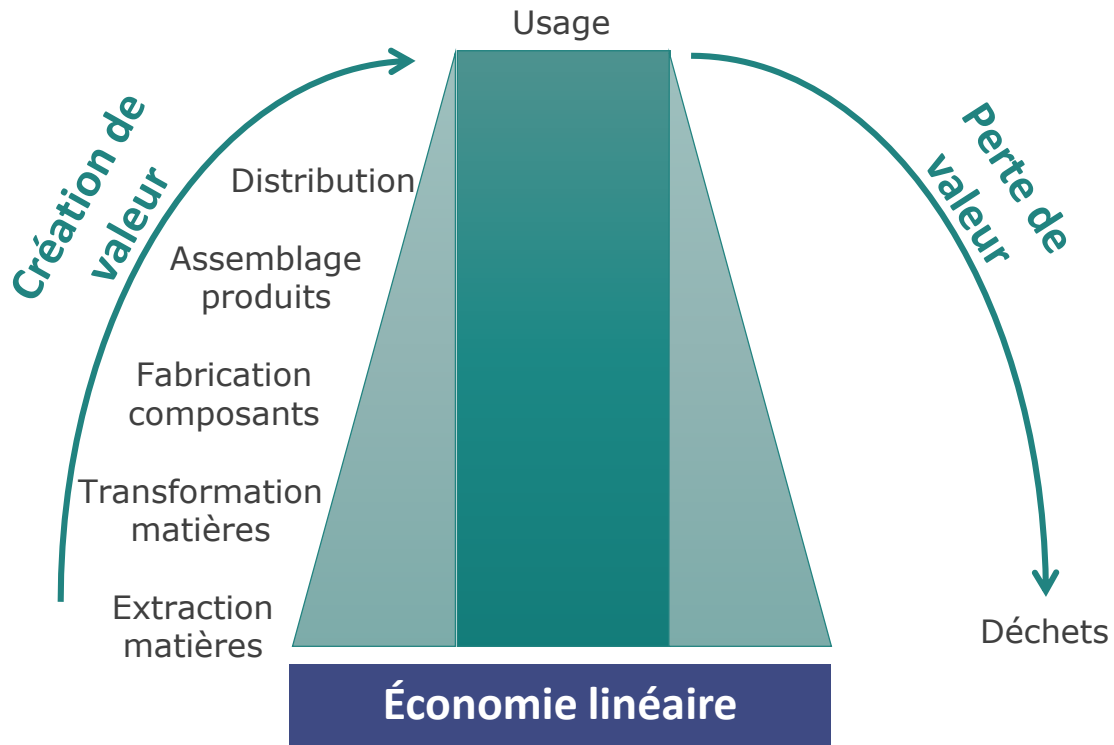
- Forts investissements capitalistiques (mines + raffinage)
- Extraction minière : 10% de la production mondiale d'énergie primaire*
- Raffinage : impact environnemental important selon le lieu de production
- Acceptation sociétale

*données Nuss & Eckelman 2014

► **Maîtrise du cycle des matières indispensable !**



Cycle des matières : d'un contexte d'économie linéaire...

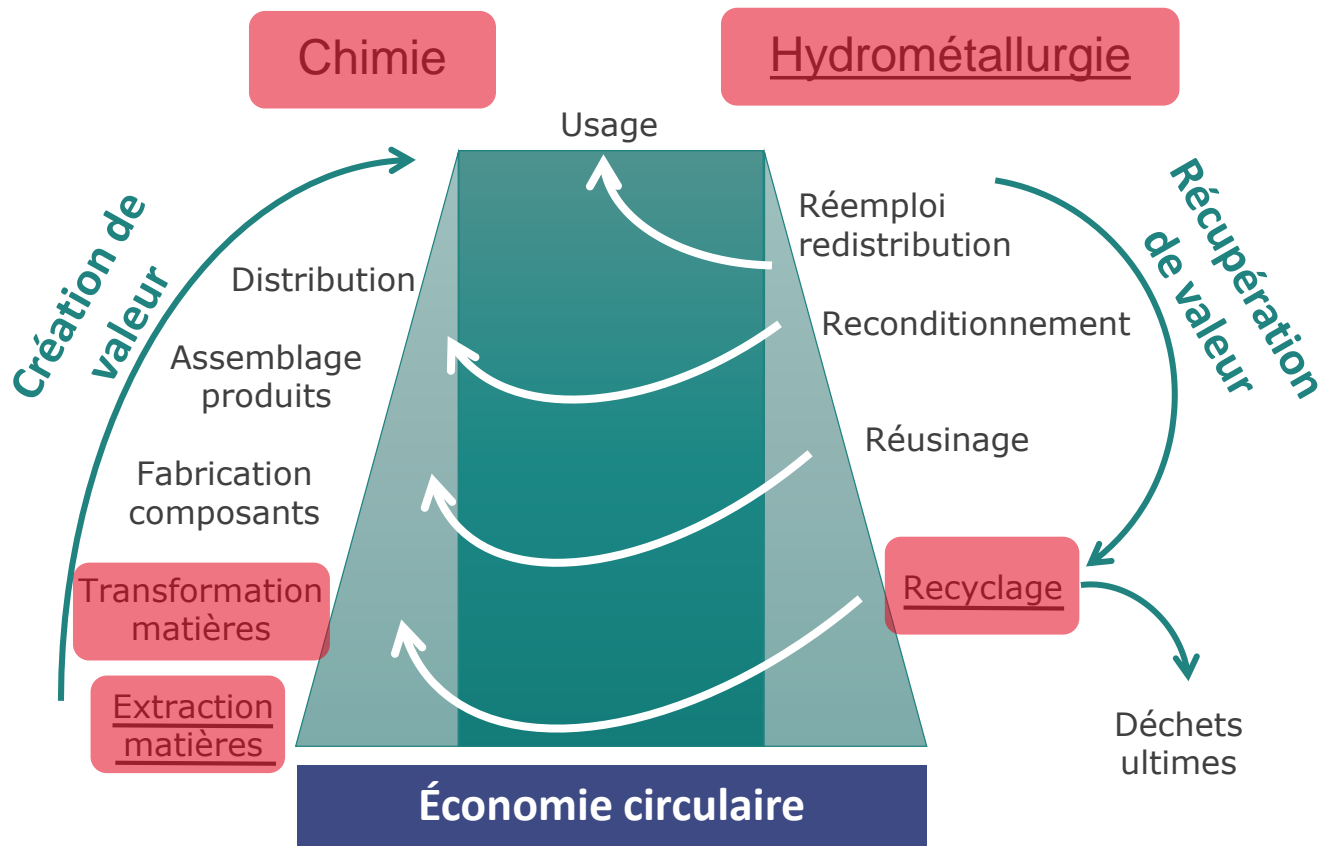


► Recréer de la valeur dans le cycle des matières

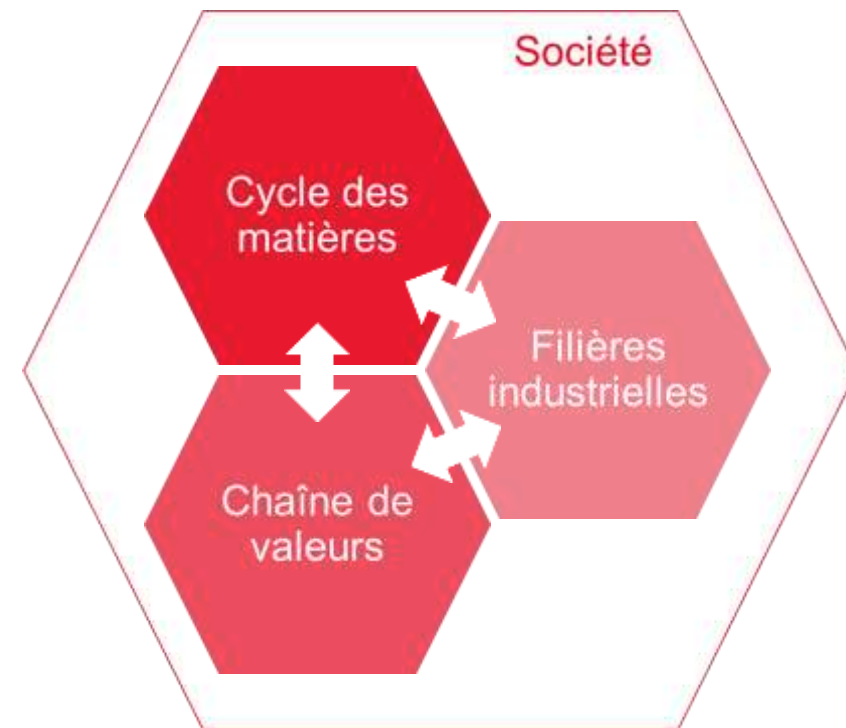
D'après le concept de « value hill » ([Master circular economy with the value hill](#))



Cycle des matières : vers une logique d'économie circulaire...



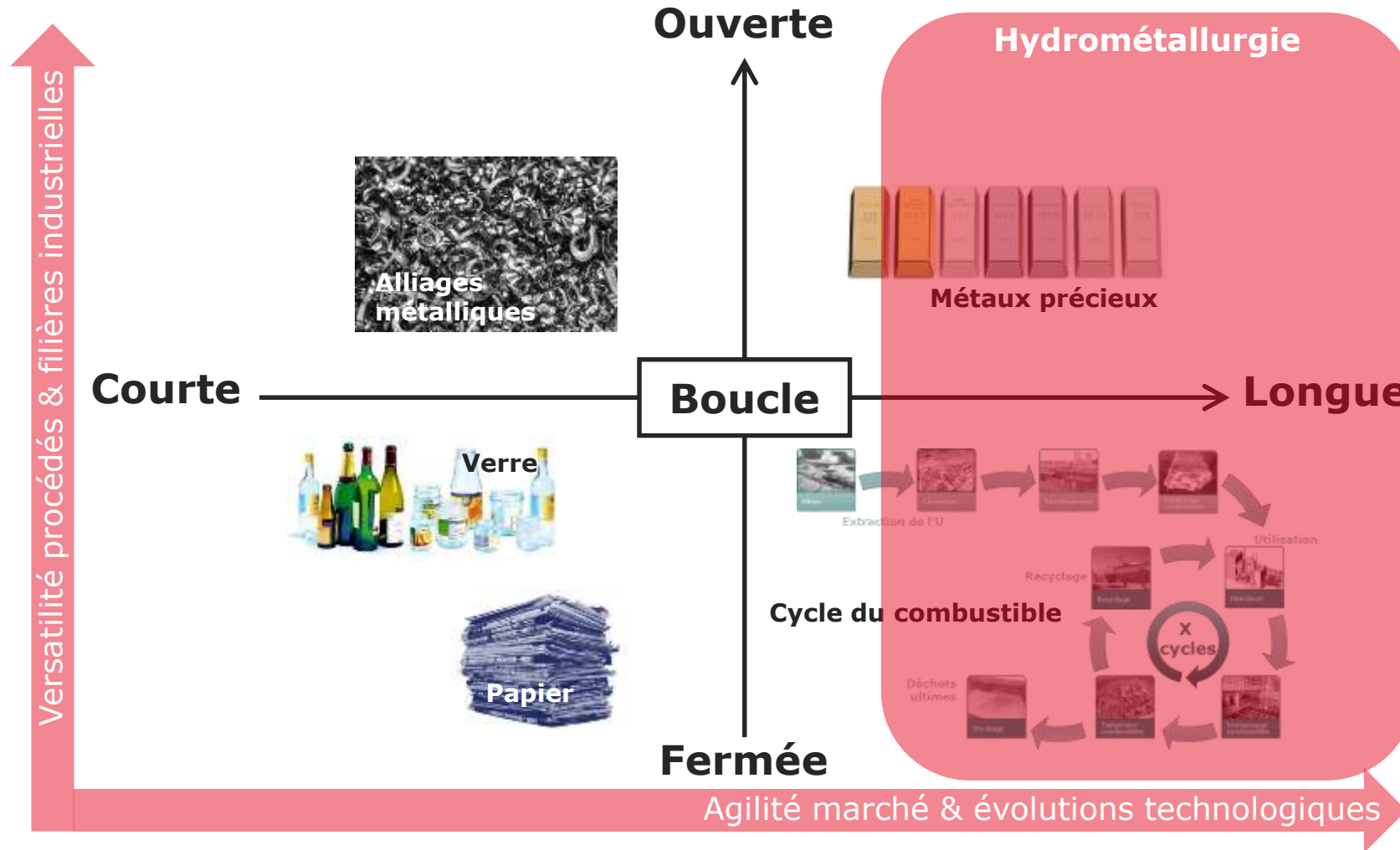
- Enjeux de l'économie circulaire des matières



► Approche intégrée pour l'économie circulaire des matières

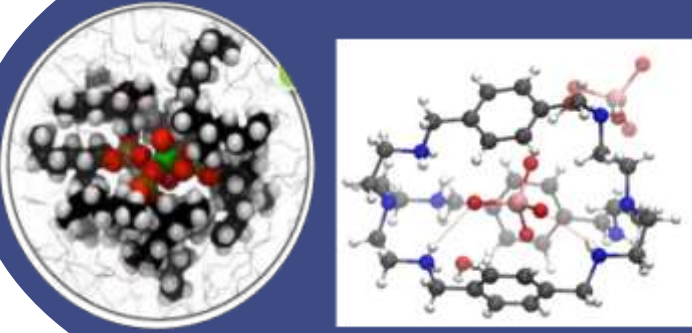
D'après le concept de « value hill » ([Master circular economy with the value hill](#))

Recyclage des matières : quelle boucle choisir ?



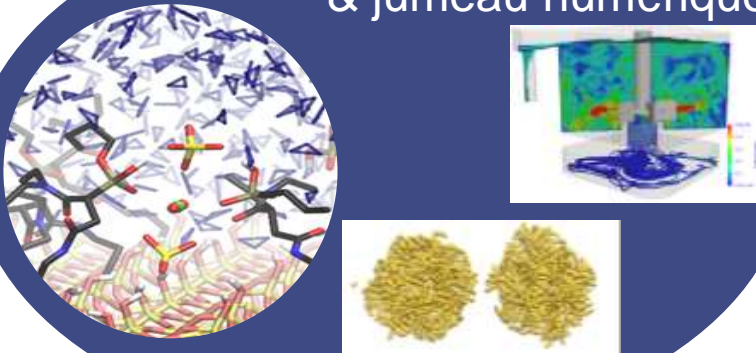
► Choix dépendant de l'analyse du cycle de vie, mais aussi de la chaîne de valeurs & des filières industrielles

Hydrométallurgie : au-delà de la molécule extractante...



Molécule extractante

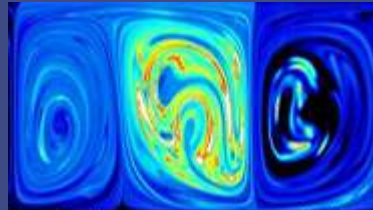
Modélisation
& jumeau numérique



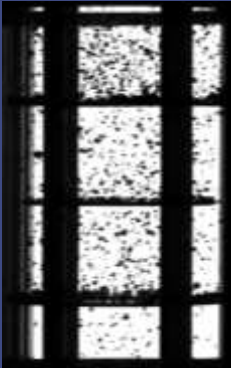
Séparation L/L & S/L

Expérimentations

Laser induced fluorescence

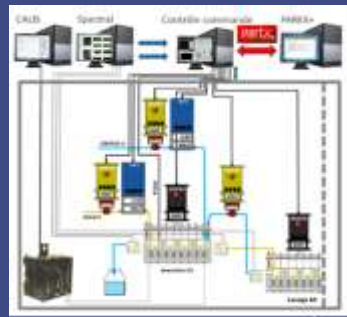


Colonne pulsée

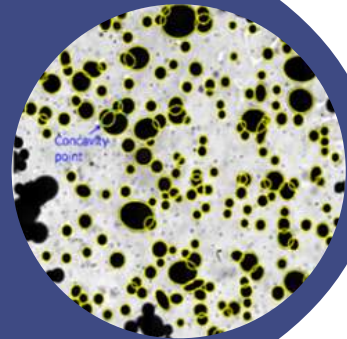


Caractérisations

Pilotage de procédé



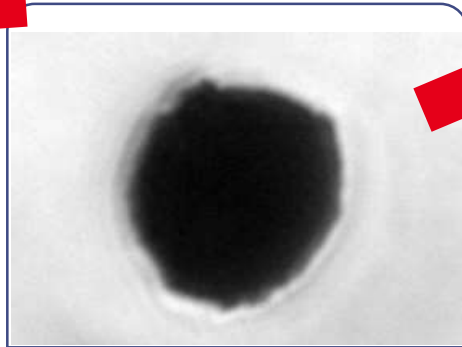
Ombroscopie



Hydrométallurgie : approche systémique...



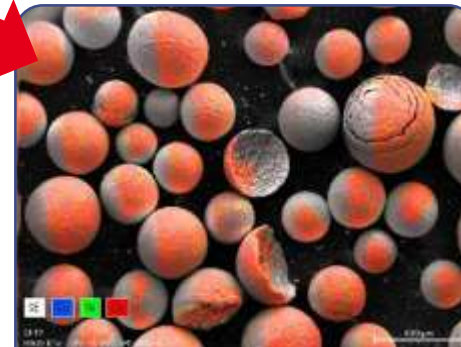
Préparation



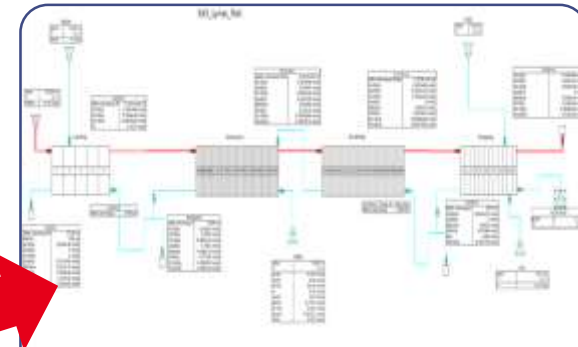
Dissolution



Séparation L/L & S/L



Conversion



Recyclage des solvants/supports



Hydrométallurgie : approche technico-économique...

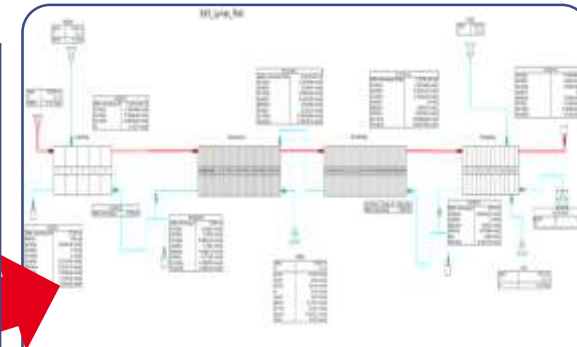
Comparaison de 5 scénarios de recyclage des aimants (projet RECAPE)

- **TODGA** : procédé avec extractant plus sélectif mais non commercial (≈200€/kg pour 100-500 kg)
- **PC88A** : procédé avec molécule commerciale à 10€/kg

Procédé	Capacité (t/an)	Investissement (M€)	Coûts opératoires (M€/an)	CA (M€/an)	Bilan financier (M€/an)
PC88A	100	3,9	2,3	2,3	-1,3
TODGA	100	3,7	1,9	0,8	-2,3
PC88A	1661	15,0	9,1	33,0	23,0
TODGA optimisé	1661	11,0	5,3	29,0	38,0

Evaluation intégrant le recyclage des solvants/support et la gestion des déchets

- ▶ Détermination de la capacité de traitement permettant d'atteindre le seuil de rentabilité
- ▶ Technico-économie : choix entre procédé + sélectif /+ cher vs procédé – sélectif/- cher

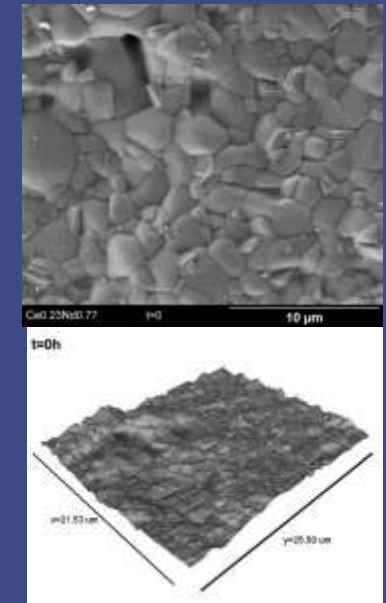


Recyclage des solvants/supports

Hydrométallurgie : dissolution, étape déterminante...



- **Choix du milieu d'attaque chimique**
 - Dissolution sélective
 - Gestion des résidus
 - Milieu de dissolution (= milieu de séparation)
 - Coûts & recyclage des milieux de dissolution
 - **Optimisation de la dissolution**
 - Mécanismes de dissolution
 - Modélisation des cinétiques
 - **Développement technologiques**
 - Géométrie des dissolvants
 - Scale-up industriel
 - ▶ **Optimisation du procédé de dissolution en fonction des intrants & de la séparation**
- Développements de procédés de dissolution du combustible nucléaire**



Hydrométallurgie : bien préparer la dissolution...

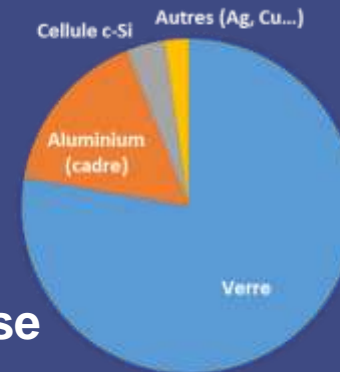


Préparation

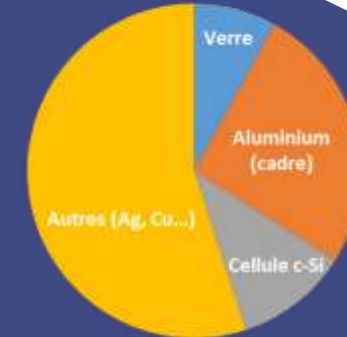
Recyclage des panneaux photovoltaïques (projet PHOTORAMA)

- Analyse de la valeur (hors polymères)

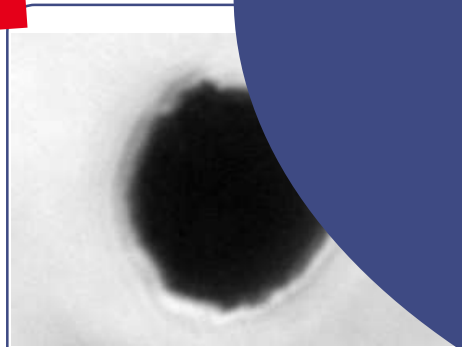
% masse



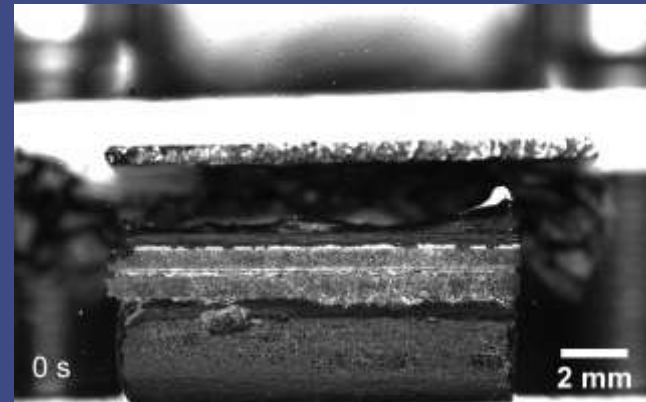
% €



- Procédé CO₂ supercritique pour séparer les couches



Dissolution

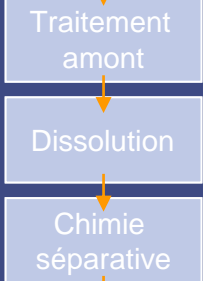


Brevet WO2020/104754

- ▶ Séparation des couches par filière de recyclage
- ▶ Dissolution & séparation des matières facilitées

Hydrométallurgie : après l'extraction...

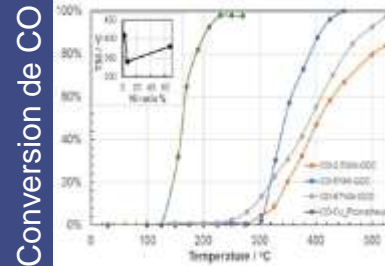
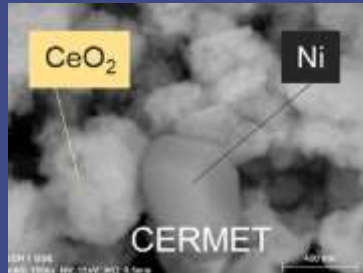
■ Schéma classique de traitement non-viable économiquement



Faible pureté

■ Procédé WAR :

batteries ⇒ CERMET ⇒ catalyseurs

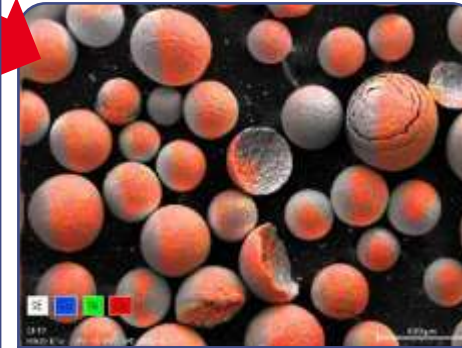


Brevet EP3034209

Haute pureté
↓
Oxydes & sels métalliques

- ▶ Haute tolérance envers les impuretés métalliques des intrants
- ▶ Boucle de recyclage ouverte pour la valorisation des matières

Valorisation de terres rares issues du recyclage des batteries Ni-MH (projet REPUTER)



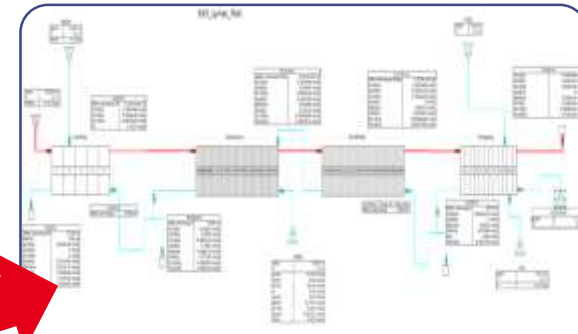
Conversion

Hydrométallurgie : au-delà de l'approche systémique...



Préparation

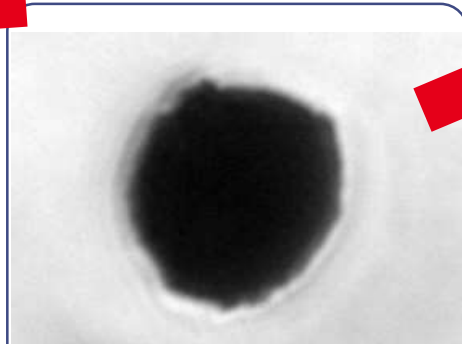
► Gestion des déchets ultimes (insolubles, solvants usagers...)



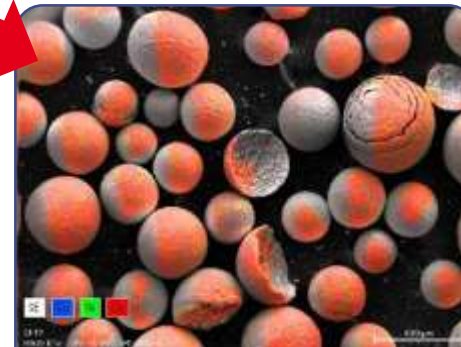
Recyclage des solvants/supports



Séparation L/L & S/L



Dissolution



Conversion

Têtes de procédé
« agile »

Exigences du
niveau de
pureté des
produits
de sortie

En conclusion :

hydrométallurgie & économie circulaire

- L'hydrométallurgie a un rôle majeur dans l'économie circulaire des matières :
 - via une approche systémique (l'optimum ne correspond pas à la somme des optima de chaque étape)
 - en intégrant au plus tôt les dimensions de l'économie circulaire :
cycle des matières/chaine de valeur/filières industrielles

► Challenge des chimistes :

- Inventer les têtes de procédés « agile »
 - Fabriquer des matériaux à partir d'intrants à faible niveau de pureté
 - Proposer ces matériaux (moins purs/non-critiques) :
 - pour des systèmes, moins performants (mais répondant aux usages),
 - le tout, associé à un modèle économique adapté
- ⇒ **s'associer avec nos collègues économistes**

Les 24, 25 et 26 mai 2023

À L'INSTITUT MONTPELLIER MANAGEMENT



FEET 2023

Forum économie circulaire des énergies bas carbone
pour la transition énergétique

Conférences
Etudiants
Challenge
industriels
entrepreneurial
Start-up
Citoyens
Territoires
Challenge
de recherche
Tables rondes
Ateliers
Entrepreneurs



Merci de votre attention

Merci à Manuel Miguiditchian, Sophie Charton, Thibaud Delahaye, Yannick Gomez, Ilyès Benkacem, Renaud Podor, Joseph Lautru, Xavier Le Goff, Stéphanie Szenknect, Nicolas Dacheux... pour leurs contributions à cette présentation

<https://isec.cea.fr/>



#cea-isec