

Importance du recyclage des matériaux stratégiques pour l'énergie du futur



Etienne Bouyer, DFP/DPg Direction déléguée aux Programmes

15^{ième} Université d'été
10-12 octobre, INSTN, Saclay



Contenu

1. Introduction sur l'économie circulaire

2. L'EC des MS

3. Illustrations sur la production, le transport, le stockage et la conversion d'énergie électrique

4. Perspectives



L'EC en quelques mots... et 7 piliers



OBJECTIFS DE DÉVELOPPEMENT DURABLE



Définitions de l'EC

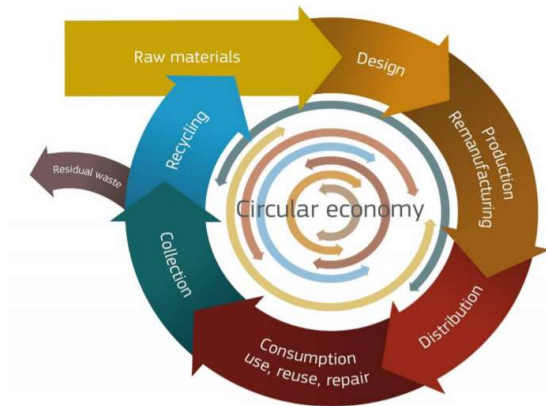


Figure 4: Conceptual diagram illustrating the Circular Economy in a simplified way



Commission Européenne

« A circular economy aims to maintain the value of products, materials and resources for as long as possible by returning them into the product cycle at the end of their use, while minimizing the generation of waste »

€/kg



Ministère de la Transition écologique et solidaire

« [une] économie différente, où nous consommons de manière sobre, où les produits ont une durée de vie plus longue, où nous limitons les gaspillages et où nous arrivons à faire de nos déchets de nouvelles ressources. »

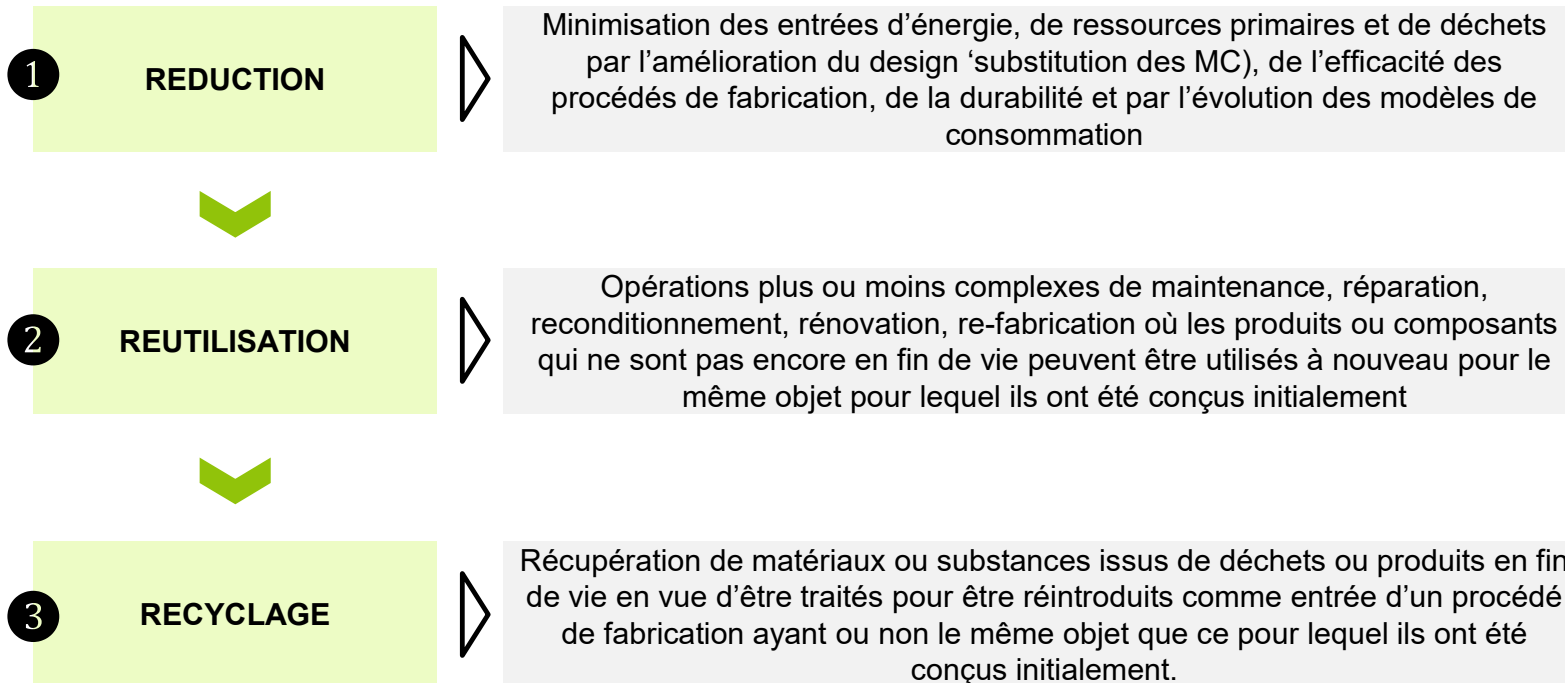
Sobriété



Introduction

- **Un concept qui n'est pas nouveau** (auparavant « écologie industrielle », « économie environnementale », « développement durable ») mais qui a l'avantage d'offrir **une dynamique fédératrice**
- Un regard holistique **qui ne se limite pas qu'au recyclage mais bien à une démarche tout le long du cycle de vie d'une innovation**
 - Design > Fabrication > Utilisation > Fin de vie
 - Matériau > Procédé > Système / Réseau / Territoire
- Une recherche **équilibrée** des **impacts** que les solutions innovantes (technologiques ou non) ont pour but de délivrer
 - Economique x Environnemental x Social = Soutenabilité
- Une approche **multidimensionnelle et multidisciplinaire**, ce qui signifie scientifique et technologique mais aussi modèles d'usages et d'affaires, réglementaire, éducation et formation, financement etc...

Principe des 3R



Impacts attendus



Impact ECONOMIQUE



- Création de richesse
- Renforcement des écosystèmes (cohérence, complémentarité, résilience)
- Réduction des dépendances à l'échelle EU (par exemple sur les CRMs)

ET

Impact ENVIRONNEMENTAL



- Réduction des gaz à effets de serre
- Réduction de l'empreinte des matériaux (en particulier critiques / toxiques) et des procédés
- Préservation de la biodiversité et réduction de la pollution de l'air / des eaux

ET

Impact SOCIAL



- Création et maintien d'emplois locaux, durables, sûrs, justes
- Amélioration de l'inclusion (parité, niveaux de qualification...)
- Amélioration de l'équilibre territorial (circuits courts, zones rurales/isolées...)

Genèse de l'implication du CEA dans l'efficacité des ressources matières, dans les MS



Signaux: tension sur les prix et multiplication de rapports/études sur les matériaux stratégiques

Constat : les technologies CEA dont les nouvelles technologies pour l'énergie sont particulièrement impactées par utilisatrices

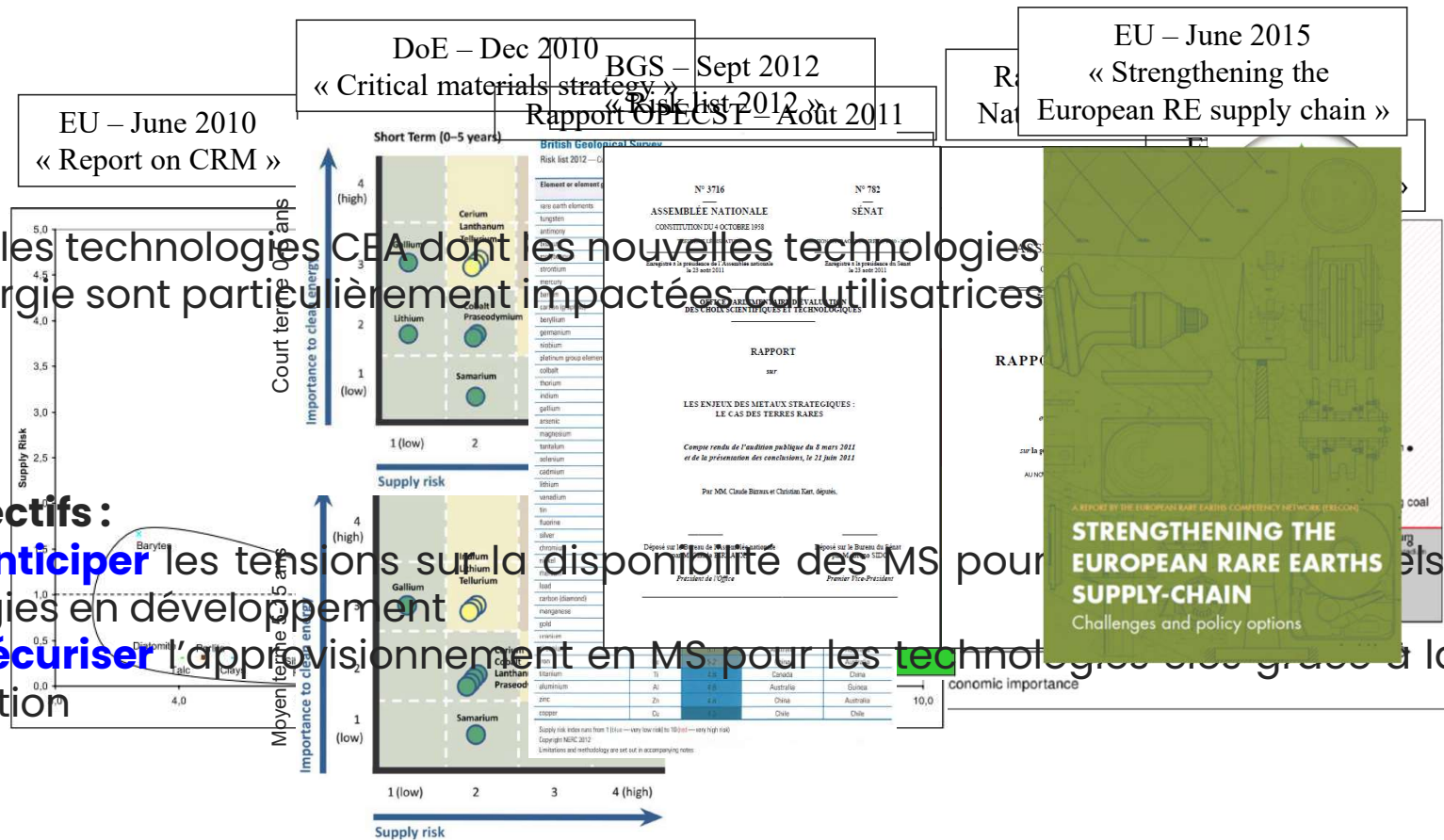
Deux objectifs :

Anticiper les tensions sur la disponibilité des MS pour les technologies en développement

technologies en développement

Sécuriser l'approvisionnement en MS pour les technologies clés grâce à la recherche & l'innovation

& l'innovation



Une prise de conscience : les terres rares



57 Lanthane	65 Terbium
58 Cérium	66 Dysprosium
59 Praséodyme	67 Holmium
60 Néodyme	68 Erbium
61 Prométhium	69 Thulium
62 Samarium	70 Ytterbium
63 Europium	71 Lutetium
64 Gadolinium	39 Yttrium



Deng Xiao Ping

« Middle Est has gas, but China has Rare earth » (1992)

China reinforce its control on a large number of rare metals

4 objectives :

- **Environnement**

Close production capacities
That are obsolete/
polluting

- **Maintain the ressource**

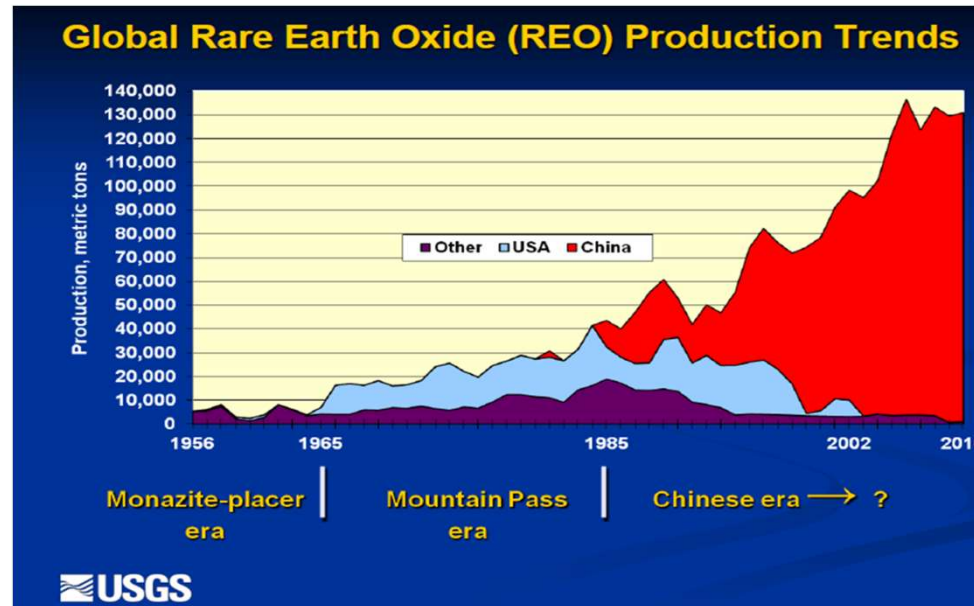
Keep it for domestic uses

- **Obtain higher prices**

Make the prices

- **Capture the added value**

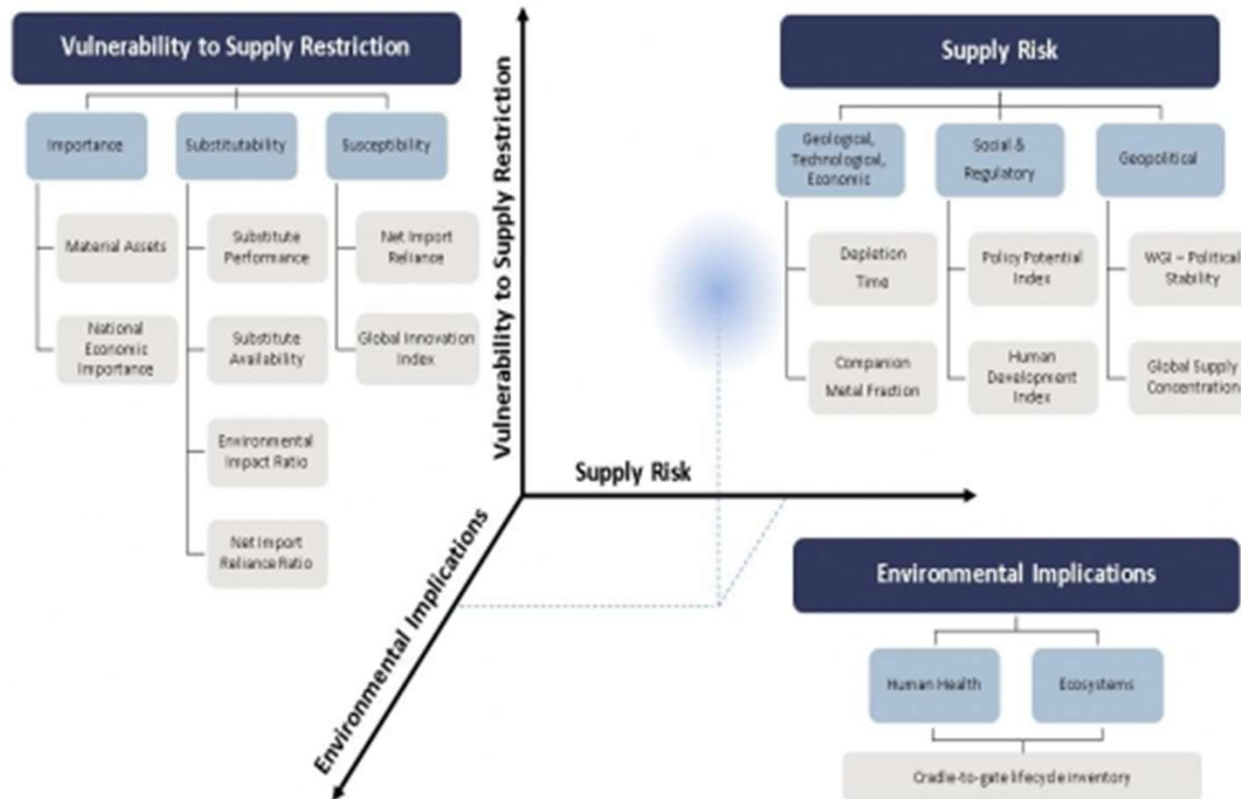
Invest & industrialize high-tech products
in China



➔ Territorial Senkaku islands incident ,
07 sept 2010 : beginning of chinese
embargo to Japan, then exportation
quotas for the rest of the world

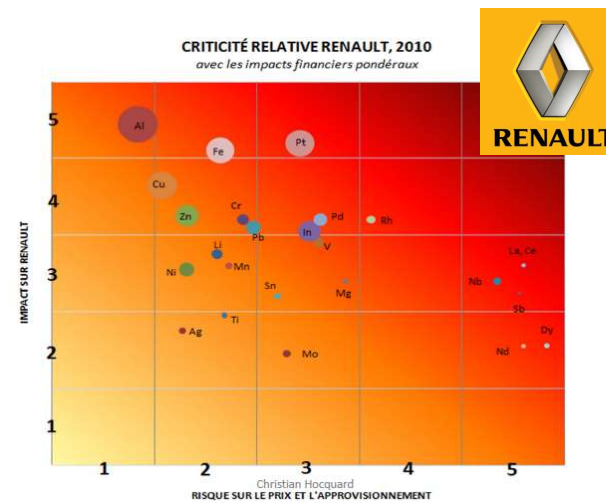
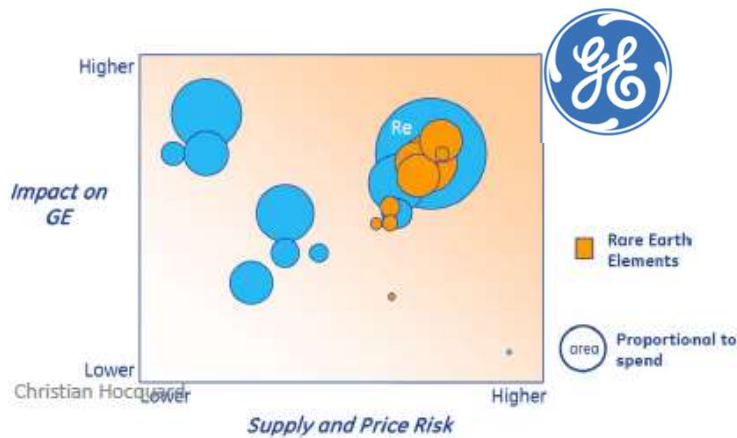
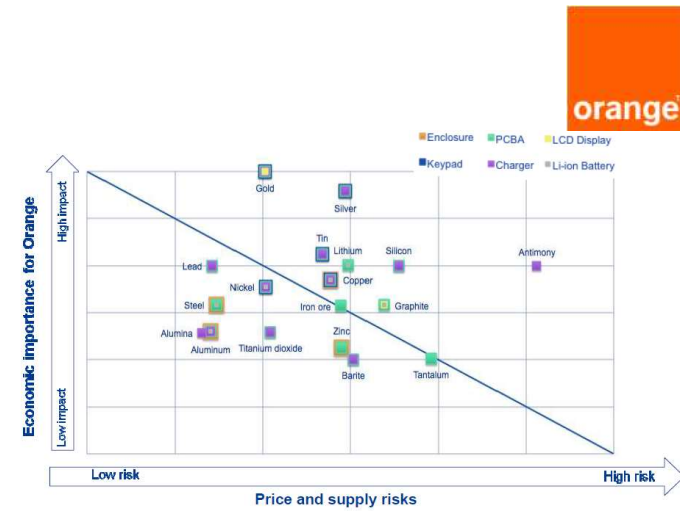
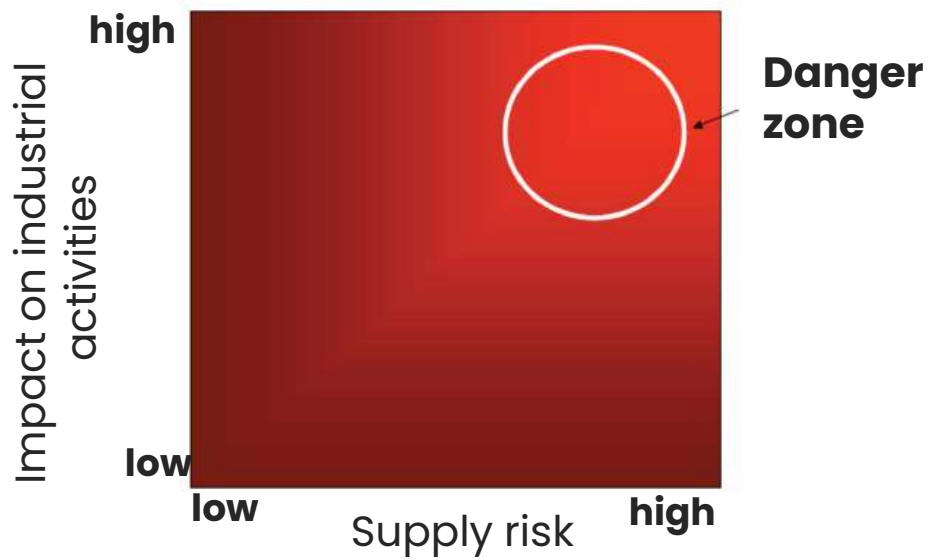
(Complaint under WTO from USA, EC & Japan | March 13th 2012)

Matrice de criticité 1/2



Th. Graedel, Center for Industrial Ecology, Yale University

Matrice de criticité 2/2



Les nouvelles technologies pour l'énergie sont gourmandes en substances critiques



Liste CRM 2020 		
Antimoine	Hafnium	Phosphore
Baryte	Terres rares lourdes	Scandium
Beryllium	Terres rares légères	Silicium (métal)
Bismuth	Indium	Tantale
Borate	Magnesium	Tungstène
Cobalt	Graphite naturel	Vanadium
Coking coal	Caoutchouc naturel	Bauxite
Fluorite	Niobium	Lithium
Gallium	Platinoïdes	Titane
Germanium	Phosphate	Strontium

Contexte et approches de l'EC pour une meilleure efficacité matière

Les technologies telles que les batteries Li-ion, les aimants permanents nécessitent des matériaux et des procédés associés pour les synthétiser/préparer, les transformer et les mettre en forme afin de construire des composants, des dispositifs et des systèmes intégrés.

Afin d'optimiser les activités en amont et en aval et de réduire ainsi l'empreinte technologique, 4 axes principaux ont été retenus:

- Emploi de matériaux abondants (ou les précurseurs de ces matériaux)
- Minimiser ou éviter l'usage de MC
- Promouvoir les procédés propres et efficaces (limitant/évitant les déchets, les effluents)
- Optimiser la conception pour faciliter la 2nd vie et le traitement en fin de vie (recyclage)





Comment mettre en œuvre des activités de substitution ?

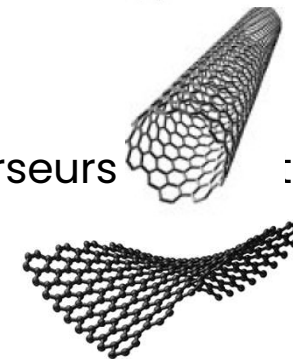
En pratique, 4 forces motrices motivent des travaux sur la substitution :

➔ Pénurie potentielle ou existante sur une substance donnée entraînant une augmentation des prix et/ou des difficultés d'approvisionnement (MS)



➔ Bannissement de substances causé par les réglementations (toxicité,...) **Cd, Cr^{VI}**

➔ Nouveaux (abondants & non toxiques) matériaux/précurseurs de nouvelles applications



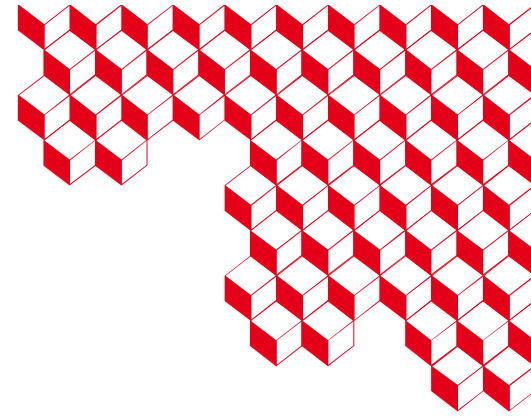
➔ Besoin continu de matériaux aux propriétés améliorées (performances, durabilité)

Comment mettre en œuvre des activités de substitution au niveau des procédés ?



En pratique, 4 forces motrices motivent des travaux sur les procédés :

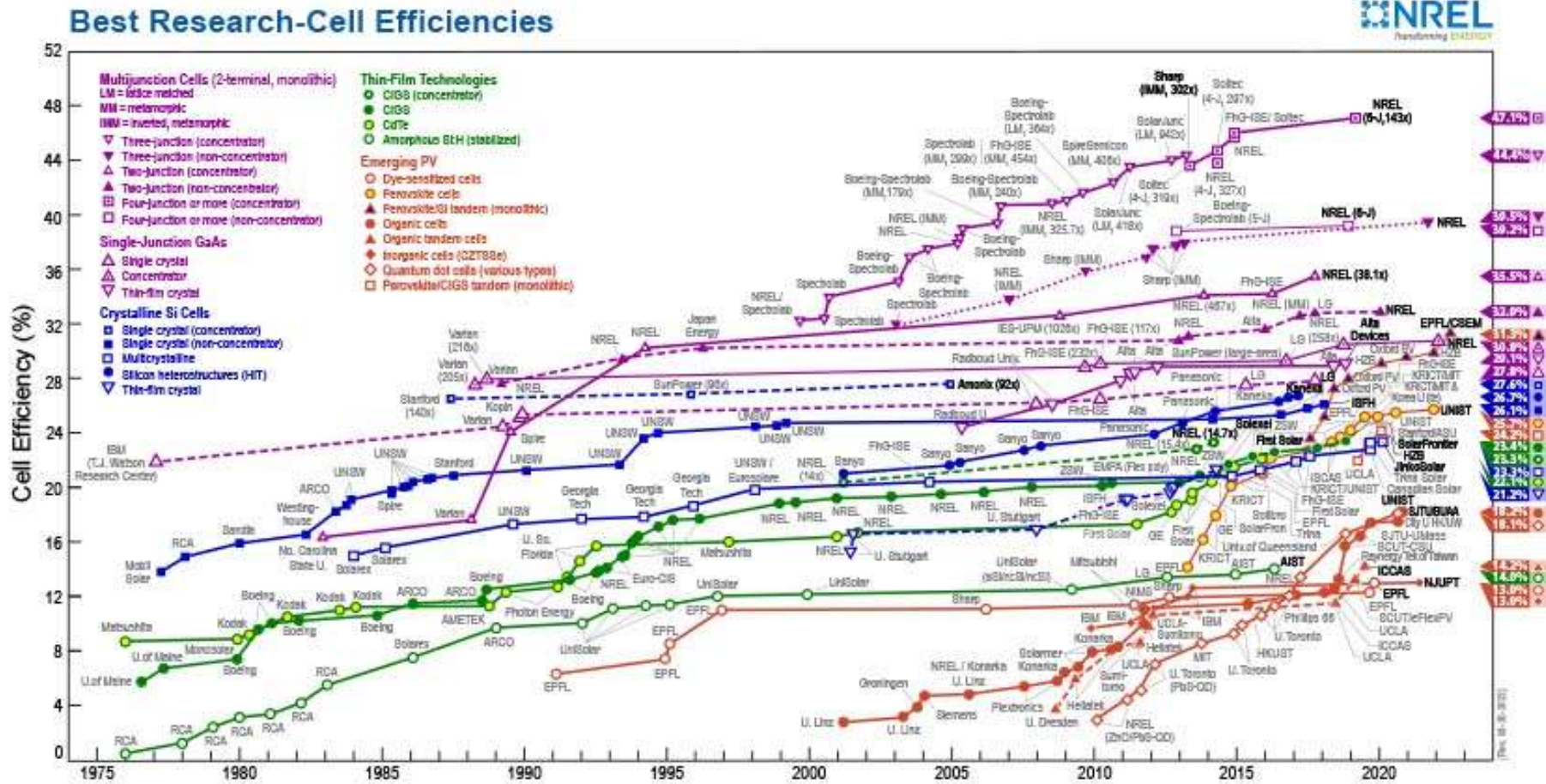
- ➔ Limiter la fabrication " substractive " et promouvoir l' " additive " pour réaliser les pièces et composants à la forme (e.g. impression 3D, injection moulage,...)
- ➔ Modifier les procédés pour les rendre sans solvant (e.g. FSC) ou avec des solvants plus moins impactants (LIs) avec une faible consommation d'eau
- ➔ Convertir les procédés actuels ou générer de nouvelles approches pour opérer avec des matières premières nouvelles/alternatives (e.g. CO₂, matières bio-sourcées, recyclées)
- ➔ Besoin constant de procédés aux performances croissantes (rendement, débit, intensification), robuste et consommant moins d'énergie et de matières premières



“ Production d’énergie



Tableau de bord du PV (technologie vs rendement)



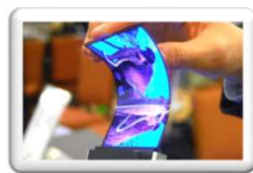
Substitution de l'ITO (oxyde d'indium et d'étain) comme couche transparente conductrice



➤ Polymères conducteurs		
➤ NTC		
➤ Graphène		
➤ Nanofils métalliques		

- Remplacement de l'In par des nanofils d'Ag

UN NOUVEAU BESOIN POUR DES ÉLECTRODES TRANSPARENTES



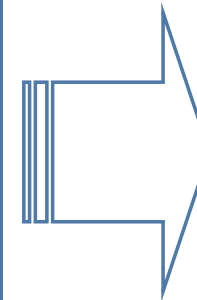
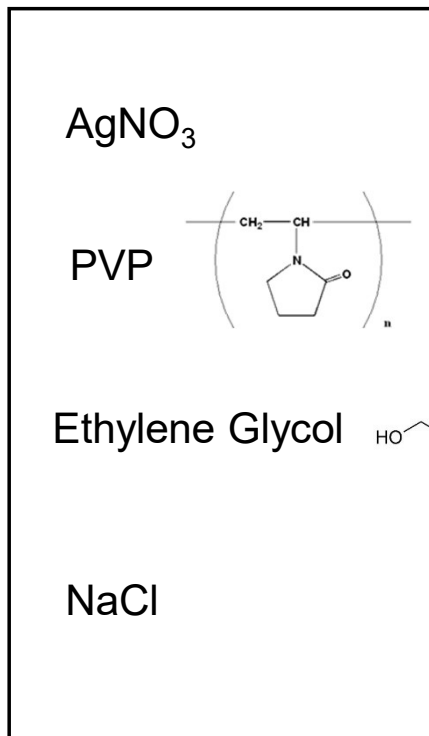
L'ITO présente de sérieuses limitations

- × *In est un des MS majeurs*
- × *Coûts procédés élevés*
- × *Fragile*

Alternatives ?

- ✓ *Conducteur / Transparent*
- ✓ *Flexible*
- ✓ *Bas coût (matériaux / procédés)*

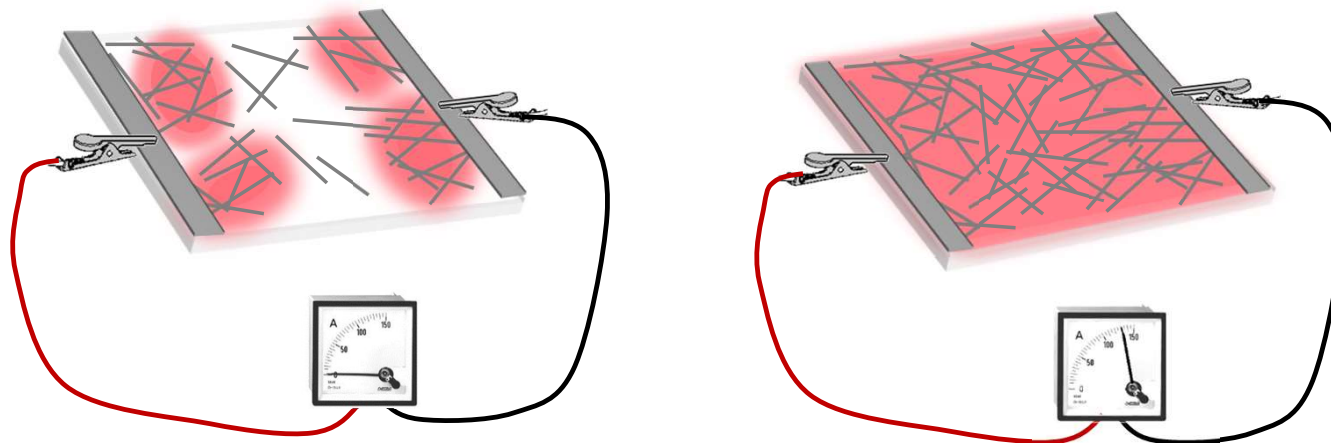
Synthèse de nanofils d'argent



Réseau aléatoire percolant de nanofils d'Ag

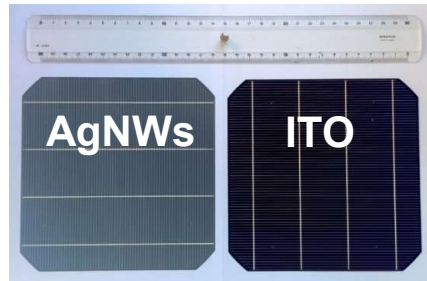


Une méthode de choix : revêtement par pulvérisation

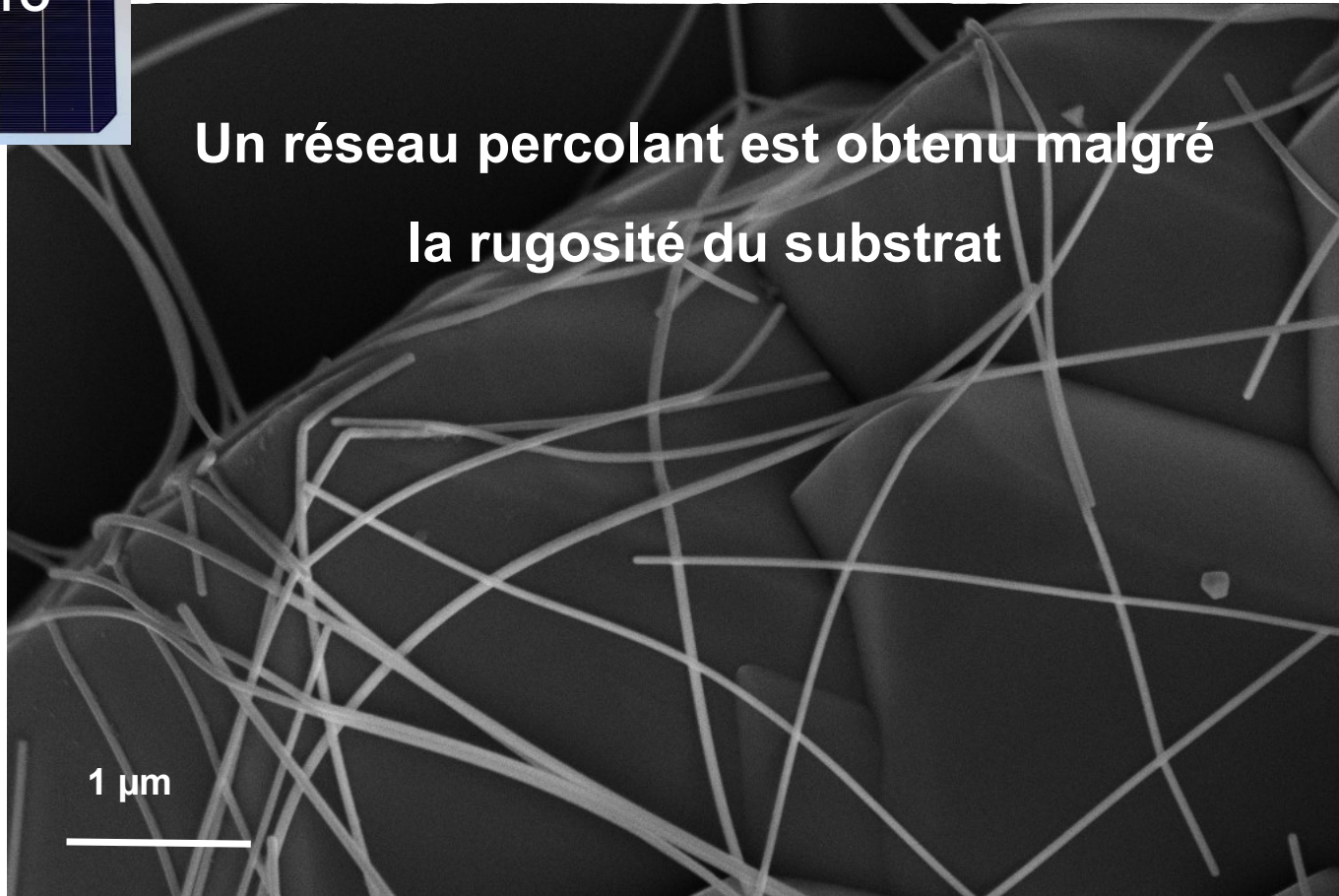


Percolation

Premiers essais sur structure HET



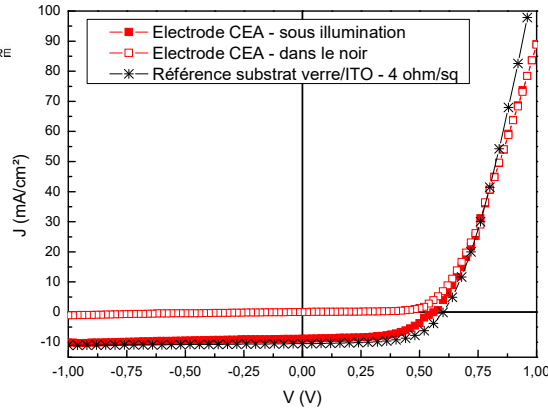
Un réseau percolant est obtenu malgré
la rugosité du substrat



Intégration avec succès dans des dispositifs

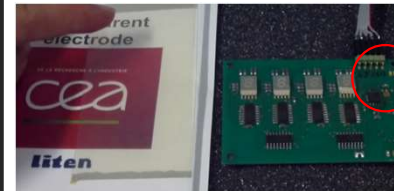


OPV Cell

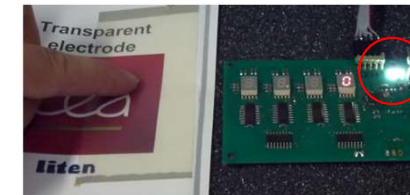


Rdt: 3,1 % Resultats ~ ITO

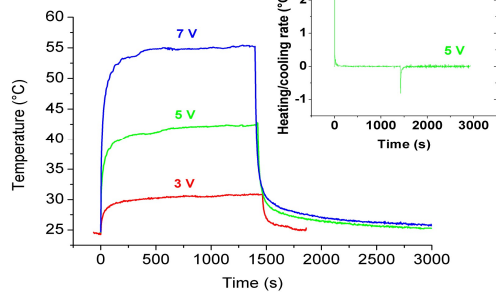
Écran tactile



Écran tactile capacitif,
transparent et flexible



Couche mince résistive chauffante

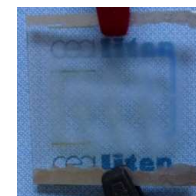


PEN substrate ($35 \Omega \cdot \text{sq}^{-1}$)

Application pour écran thermochromique



12V



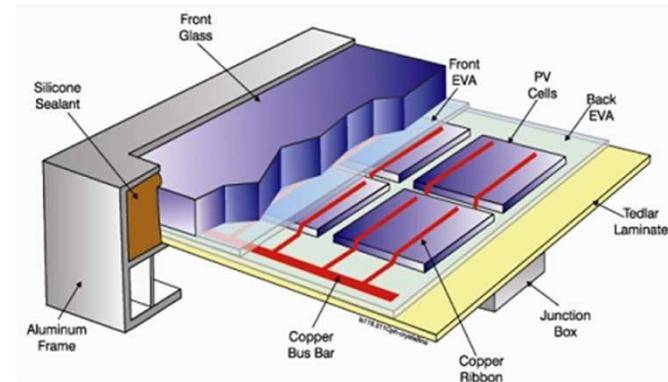
⊕ D'autres types d'intégration:

- OPDs
- OLEDs
- Antennes
- Blindage EM
- Dégivrage spécifique

Développement de modules PV légers



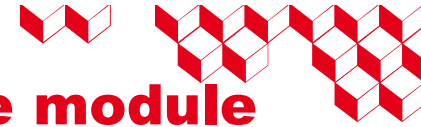
- **Composition d'un module PV standard :**
 - Cellule solaire $\approx 160 \mu\text{m}$.
 - Encapsulant $\approx 400\text{-}600 \mu\text{m}$ de chaque côté.
 - Verre $\approx 3 \text{ mm}$.
 - Feuille de fond $\approx 300 \mu\text{m}$ en face arrière.



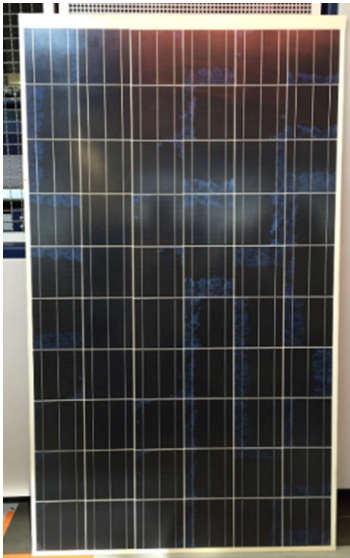
- Masse d'un module PV standard $\approx 11\text{-}12 \text{ kg/m}^2$



Application terrestre : OPERASOL® - light 100% composite module



- **Besoins des forces armées : autonomie énergétique durant les déploiements rapides en operations**
 - Module PV légers < 4kg/m² (gain > 70% vs standard 12kg/m²)
 - Installation facile, « Customisable »



Structure	Honeycomb sandwich	Classical Glass/Backsheet/Frame
Encapsulant	Pre-impregnated	EVA
Thickness	14mm	30-40mm
Area	1.6 m²	1.6 m ²
Weight	6.3 kg	16-20kg

- ✓ Réduction du poids
- ✓ Préservation des propriétés d'un module PV standard
- ✓ Facilité de mise en oeuvre
- ✓ Produit personnalisé adapté à l'application



Stratobus HAPS*



Dirigeable stratosphérique autonome multi-missions, à mi-chemin entre un drone et un satellite

Spécifications très strictes dans un environnement difficile

- Forte puissance (jusqu'en fin de vie)
- Ultra-léger (< 800g/m²)
- Longue durée de vie
- Sécurité



Module ultra-léger & fin de 4m²

	Masse (g/m ²)	Puissance AM1.5 (W/m ²)
Ciblé	≤ 800 g/m ²	≥ 180 W/m ²
Mesuré	750 g/m ²	187 W/m ²

*High Altitude Pseudo Satellite

Intégration sur des véhicules



Installés sur le toit, le capot, les portes, 456 cellules PV fournissent jusqu'à 110 km d'autonomie/semaine en plus (Sono Motors, Allemagne)
Démarrage de la production en Finlande par Valmet dès 2023

La tendance... le PV everywhere !

Centrale solaire



Marché très compétitif → LCOE



Pousse les prix vers le bas !

Modules spécifiques adaptés aux différentes applications

Bâtiments, toitures, routes,...



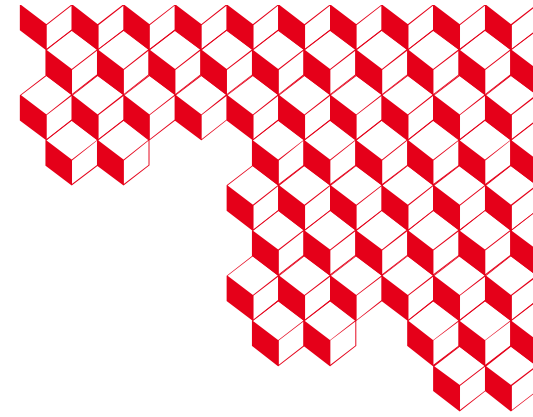
Résidentiel



Opportunités de nouveaux modèles économiques

Création de la startup **HELIUP** qui vise le déploiement de modules légers sur les toitures de bâtis industriels et commerciaux

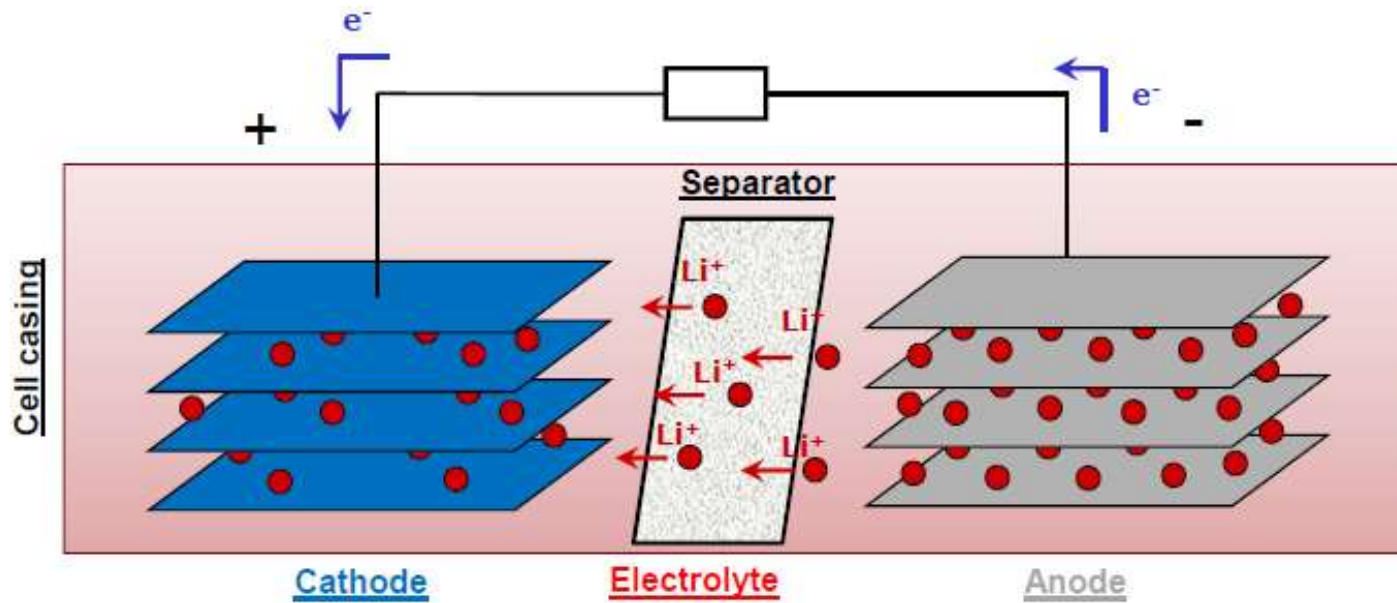
Heliup



“ Stockage d'énergie électrique

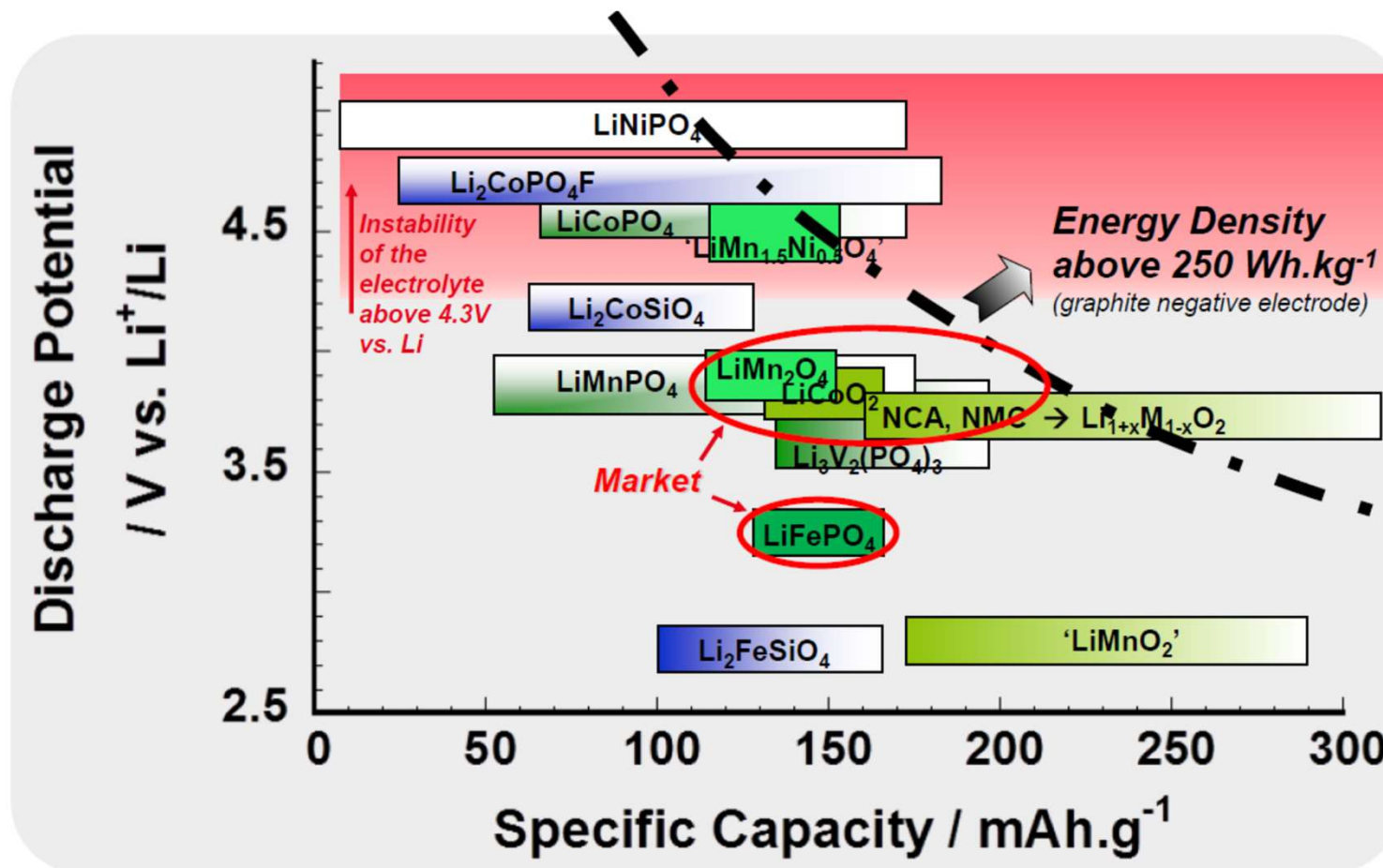


Li-ion Batteries

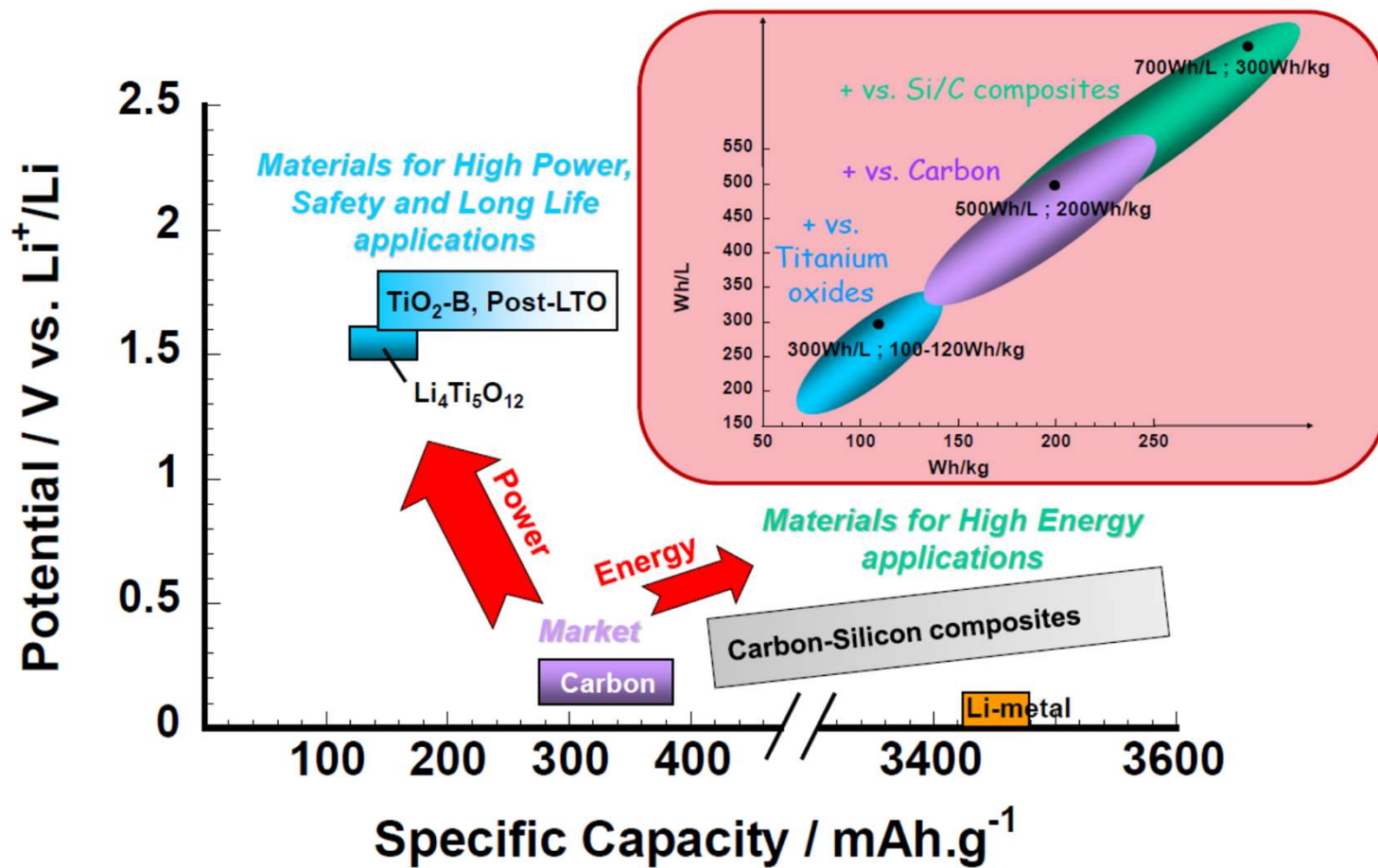


- Porous Electrodes (compromise impregnation / electronic percolation threshold)
- Electrolytic medium (electrical insulation and ionic conduction)
- Current collectors (metals, polymers and ceramics drivers carbons)
- Substrate (sealed packaging)

Cathode materials



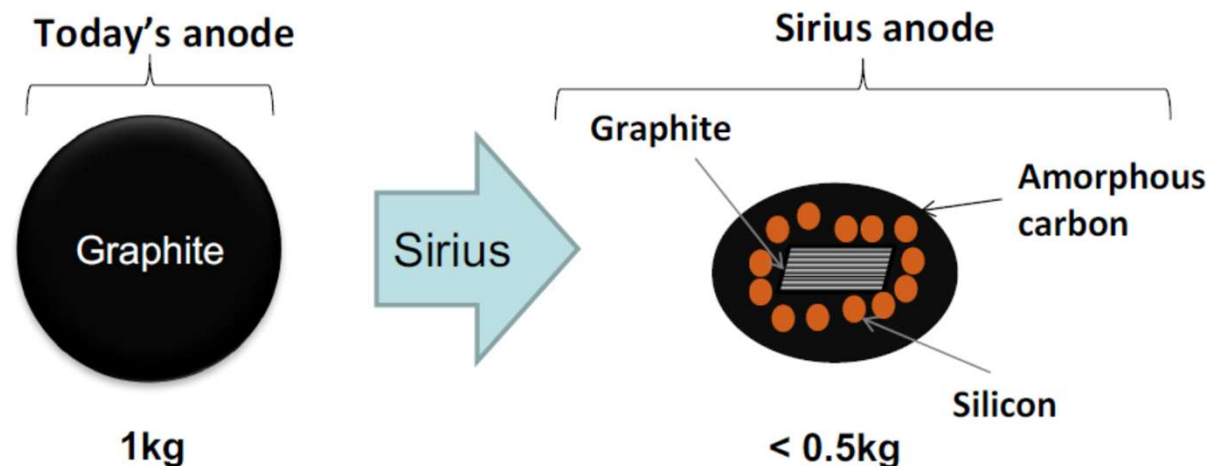
Anode materials



Objectif du projet Sirius : Silicon nanoparticles based composite UpScaling



Replace natural graphite (strategic material) in anode by Silicon-carbon composite material with higher capacity (Si 3579mAh/g vs Graphite 372mAh/g)



SIRIUS: Objectives at material and cell scale



Active materials performances objectives:

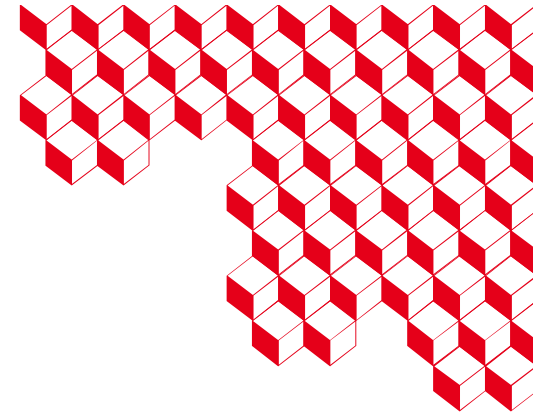
- Specific capacity : 1000 mAh/g
- Initial irreversible capacity : < 15%
- Coulombic efficiency : > 99.5%



Cell performances objectives:

- High energy density applications (> 300 Wh/kg & > 700 Wh/L)
- Intermediate cycle life (> 70% @ 500 cycles)





“ Transport d'énergie électrique



Substitution du cuivre dans les câbles



Un A380 contient
~500 km de câbles
électriques soit
approximativement...
4 Tonnes

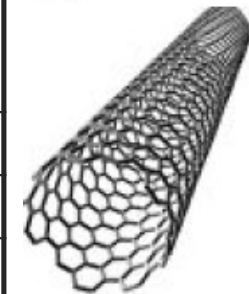


Comment trouver un substitut abondant
et léger ?

NTC : un matériau de choix pour des applications électriques

Matériau léger combinant de manière unique à la fois de bonnes propriétés électriques, thermiques et mécaniques.

	NTCs	Cu
Densité de courant ($A.cm^{-2}$)	10^9	10^6-10^7
Conductivité thermique ($W.K^{-1}.m^{-1}$)	2000-6000	400
Module d'Young (GPa)	> 1000	125
Densité ($g.cm^{-3}$)	1,3 à 1,4	8.9

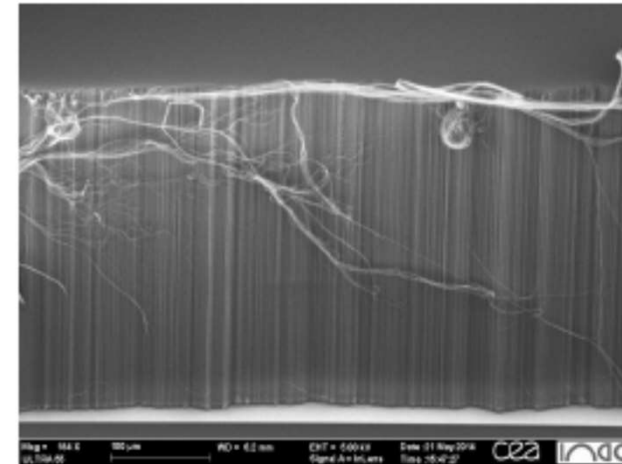
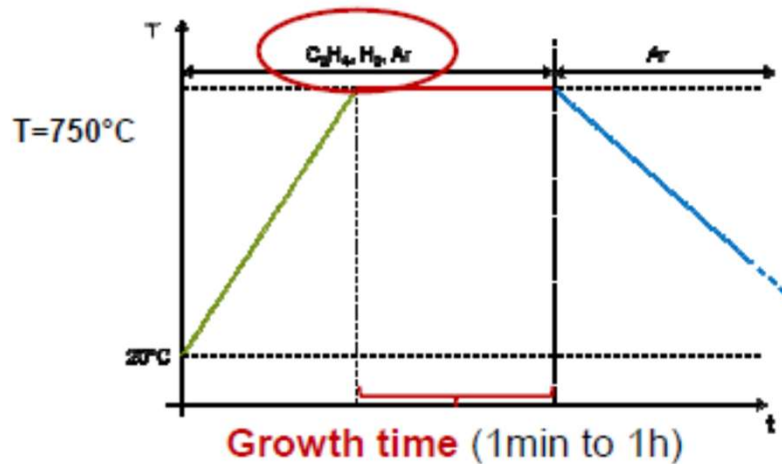
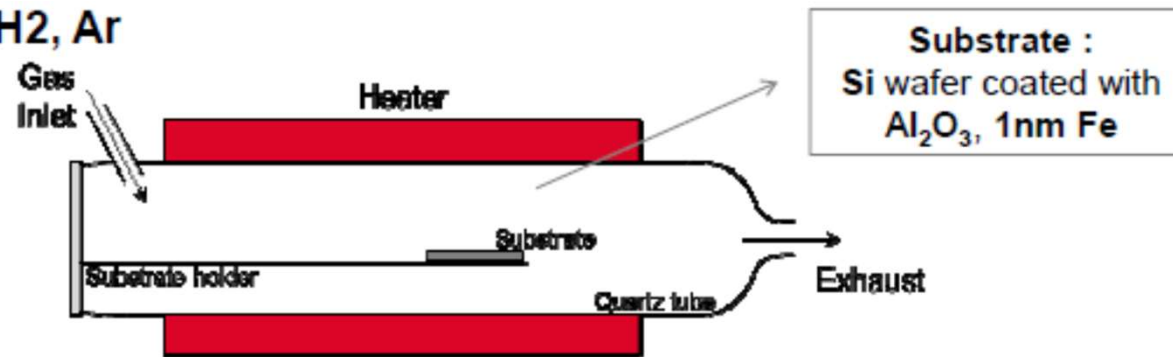


Comment assembler à l'échelle macroscopique ces nanomatériaux tout en conservant leurs propriétés exceptionnelles?

Croissance d'un tapis de NTC par AP-CVD



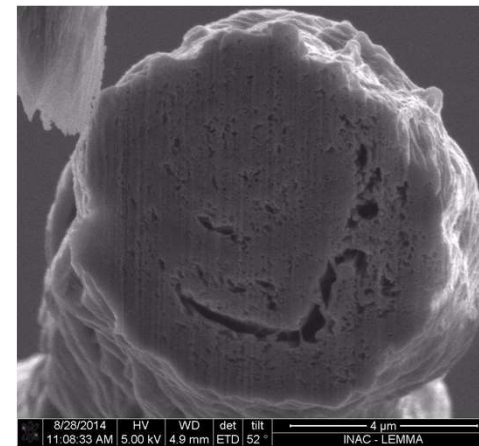
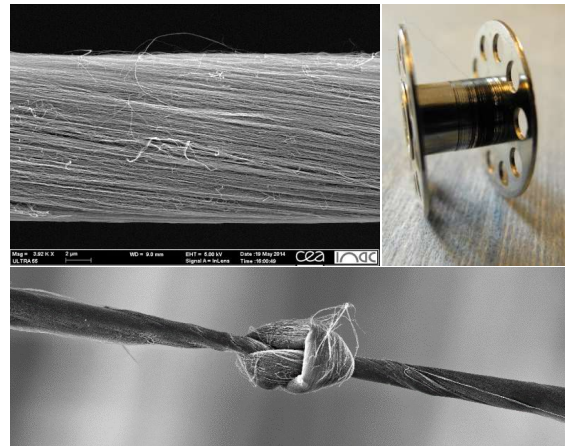
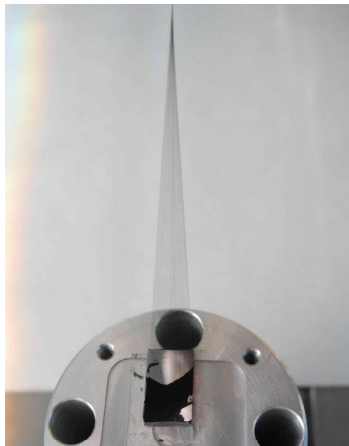
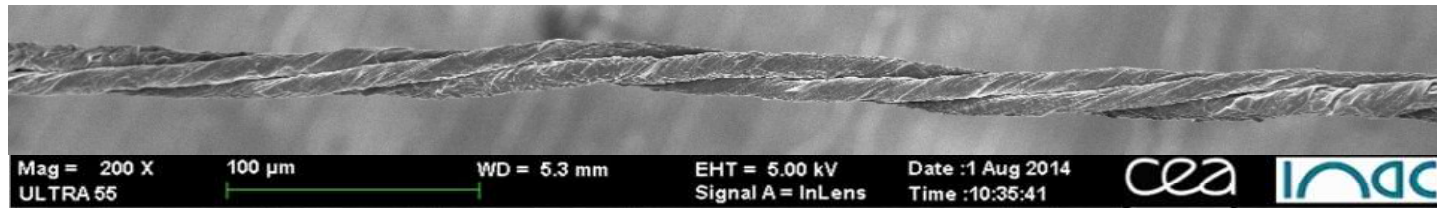
■ Gas: C₂H₄, H₂, Ar



Fabrication de fils par filage de tapis



- ✓ NTC diameter
- ✓ NTC quality
- ✓ NTC length
- ✓ NTC doping
- ✓ Yarn density



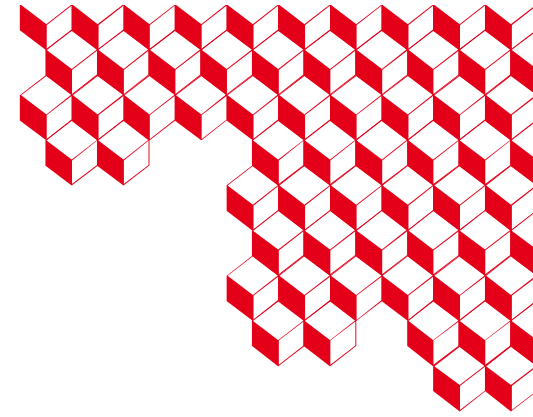
Besoin d'une meilleure densification !

Jusqu'à 15 μm de diamètre, et 10 m long



De nombreuses applications

- Electrical / data transmission (substitution of Cu, Al)
 - Neural sensors
 - Microelectrodes for medical applications (stimulation)
 - Bonding for microelectronics
 - Smart Textile
-
- Use as composites, in particular with Cu

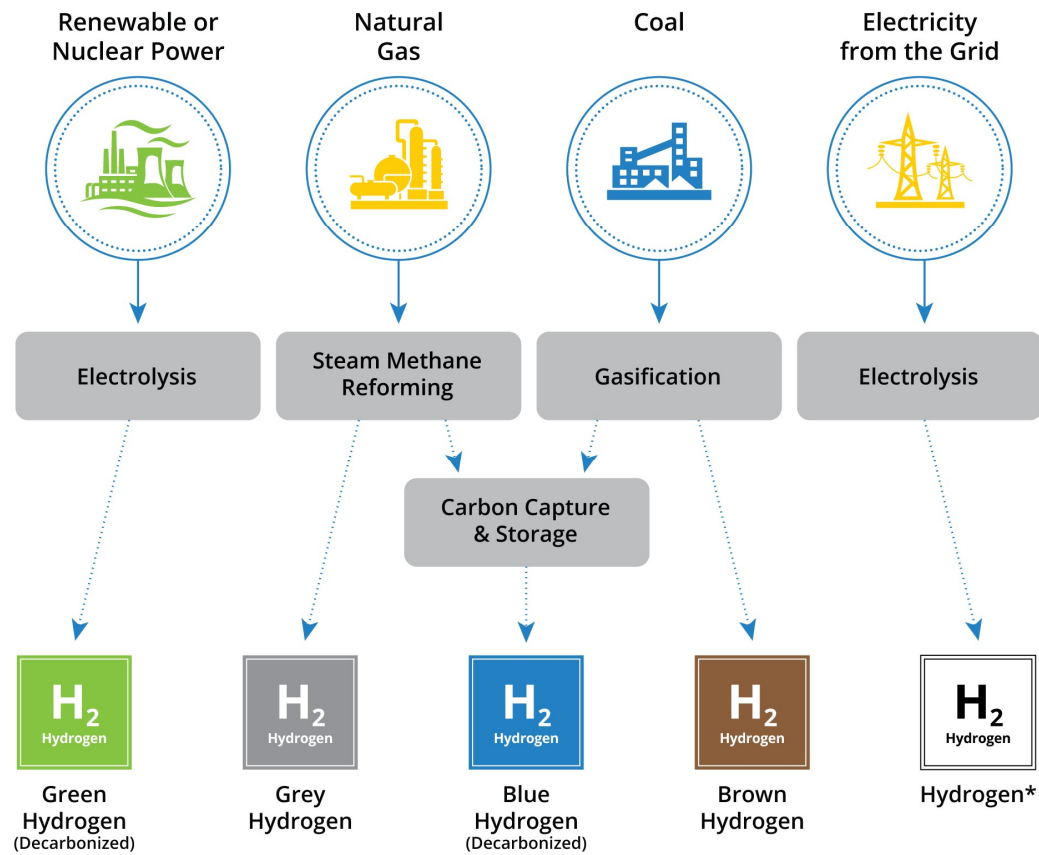


“ Conversion de l'énergie



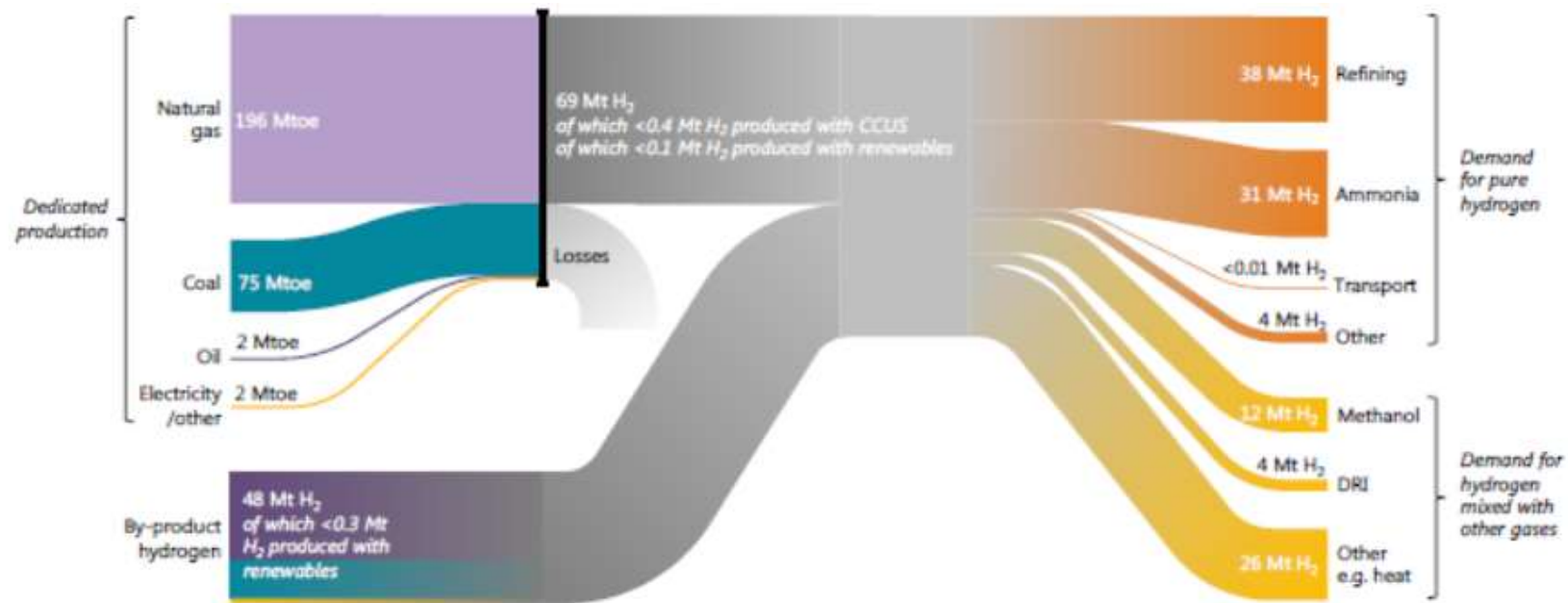


Les « couleurs » de l'hydrogène selon sa méthode de production



**Emissions depend on the mix of electricity sources on the grid*

Bilan de la production et de la consommation d'hydrogène dans le monde (2018)

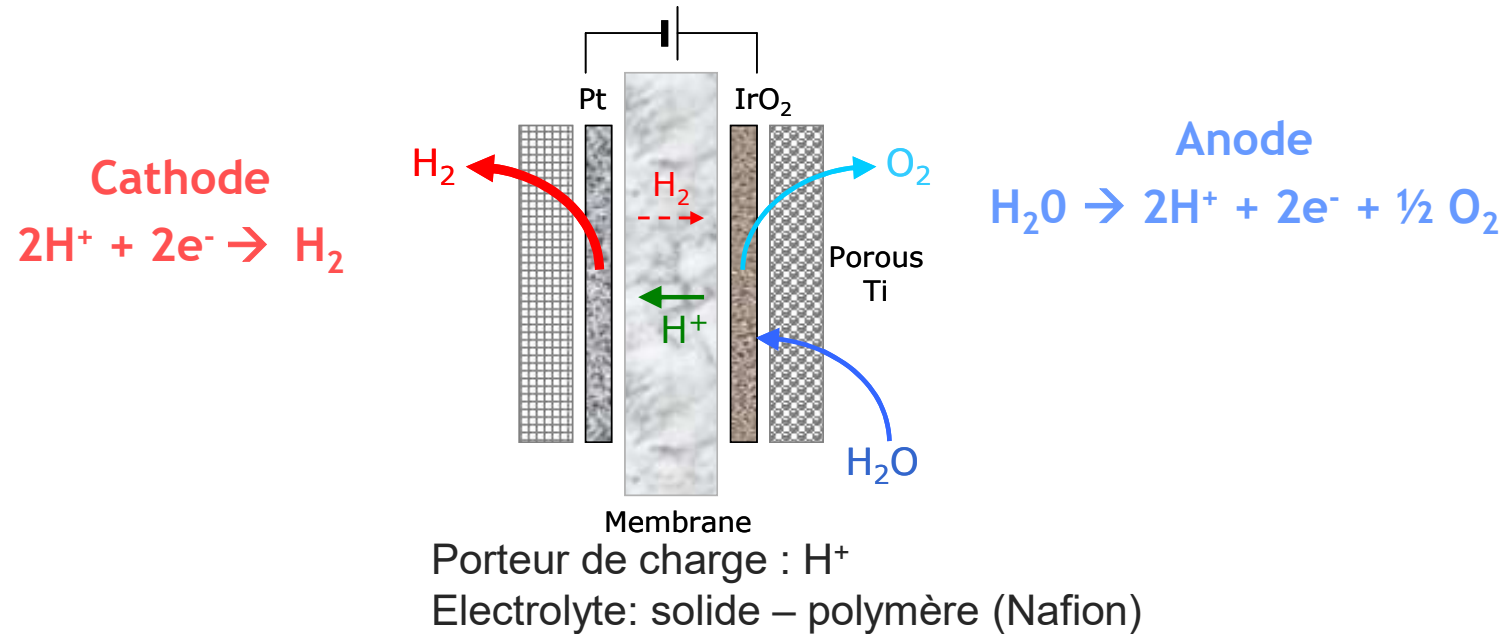


Source: IEA 2019.





Electrolyse PEM basse température



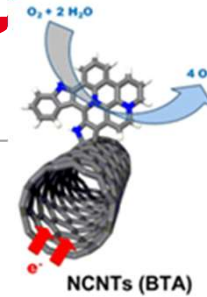
Température usuelle d'opération : ambiante-90°C
Pression usuelle d'opération : 1-150 bars

Minimisation du Pt dans les PEMFC



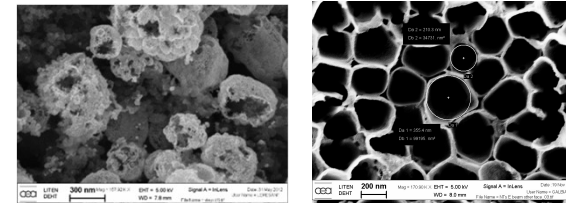
Catalyseur sans Pt

- Catalyseurs dopés à l'azote,
A. Morozan, et al., Energy Environ. 2011 ; A. Morozan et al., ChemSusChem 2012.
- Catalyseur base Ni bio-inspiré,....



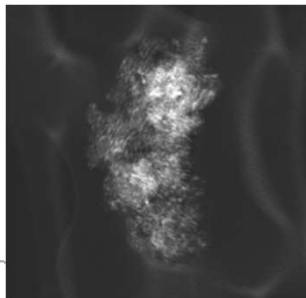
Nanos-structures de Pt

- Structure coeur-coquille,
Galbiati et al., Electrochimica Acta 2014, 125, 107-116.
- Nanotubes de Pt
Lepesant M. thesis 2014

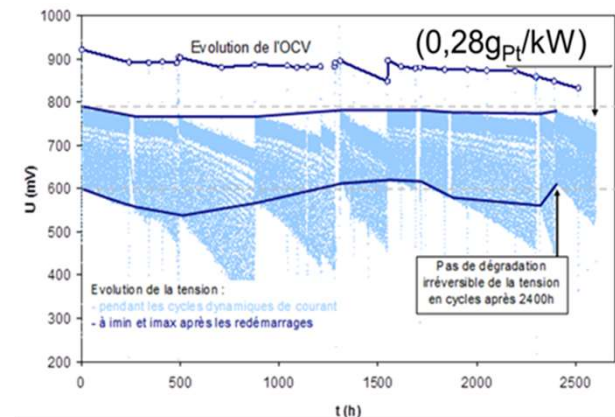


Optimisation de l'usage du Pt :

Structuration du Pt sur l'électrode par dépôt physique



Exemple: MEA with **0.2 mg_{Pt}/cm²**
de chargement total (vs 0,5 mg/cm² ref)
→ no significant degradation after
more than 2500 hours of operation in
representative transportation
conditions



Niveau de maturité

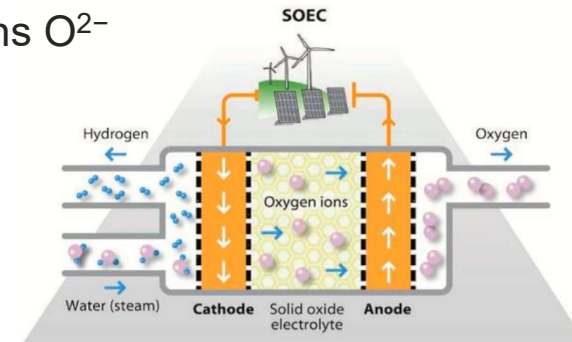
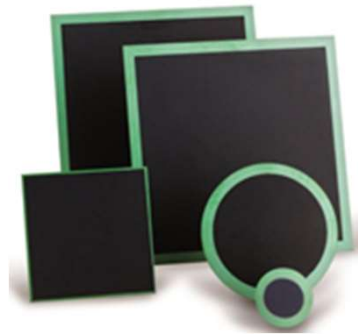


Electrolyse SOEC haute température

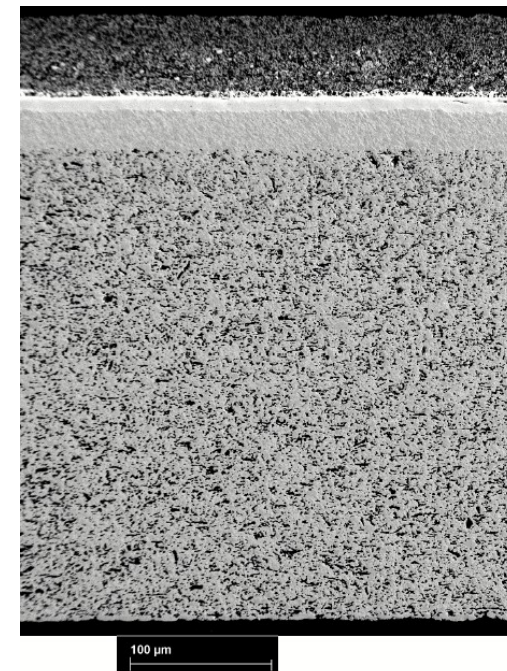
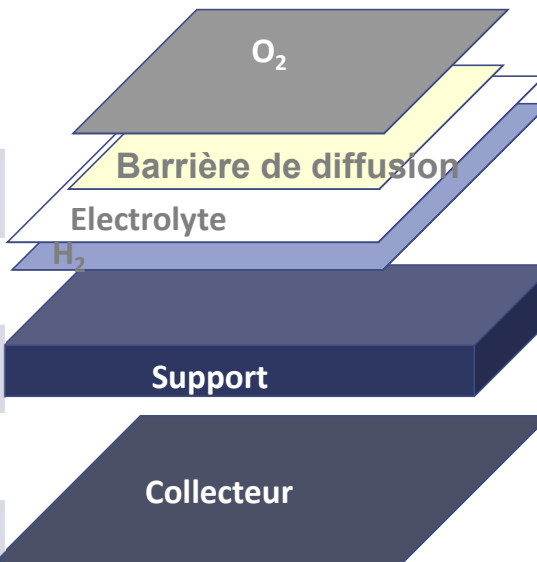
L'électrolyte solide est une membrane céramique conductrice d'ions O^{2-}

► Conditions opératoires

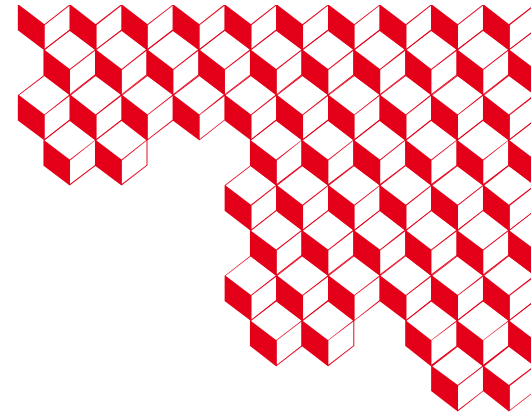
- 650 – 850 °C
- Alimenté en vapeur d'eau



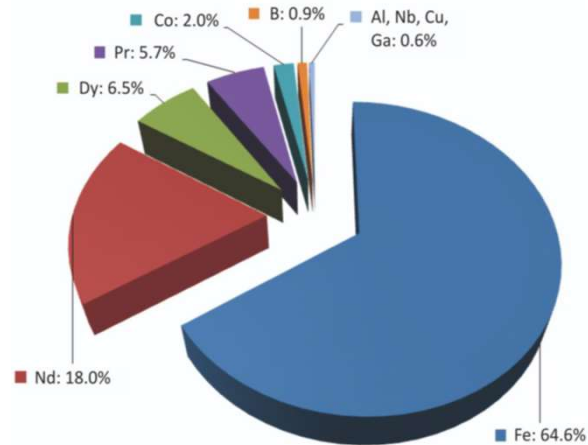
Oxygen Electrode Mixed oxide LSCF $(La_{0.60}Sr_{0.40})_{0.95}Co_{0.20}Fe_{0.80}O_{3-x}$	35 μm
Diffusion barrier Mixed oxide CGO $(Ce_{0.90}Gd_{0.10})O_{1.95}$	4 μm
Electrolyte Doped zirconia $(Y_2O_3)_{0.08}(ZrO_2)_{0.92}$	10 μm
H2 Electrode cermet Ni – YSZ $Ni - (Y_2O_3)_{0.08}(ZrO_2)_{0.92}$	30 μm
Mechanical Support Cermet Ni/YSZ $Ni - (Y_2O_3)_{0.03}(ZrO_2)_{0.97}$	30 0 μm
Current collector Nickel Ni	5 μm



“ Aimant permanent



Aimant permanent type NdFeB



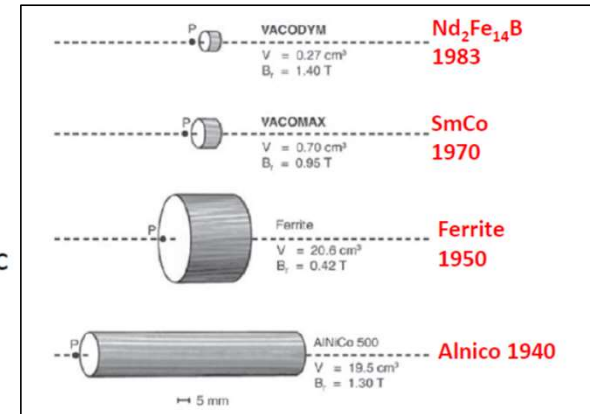
Ensemble des terres rares :

La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd,

Terres rares légères

Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu + Y, Sc

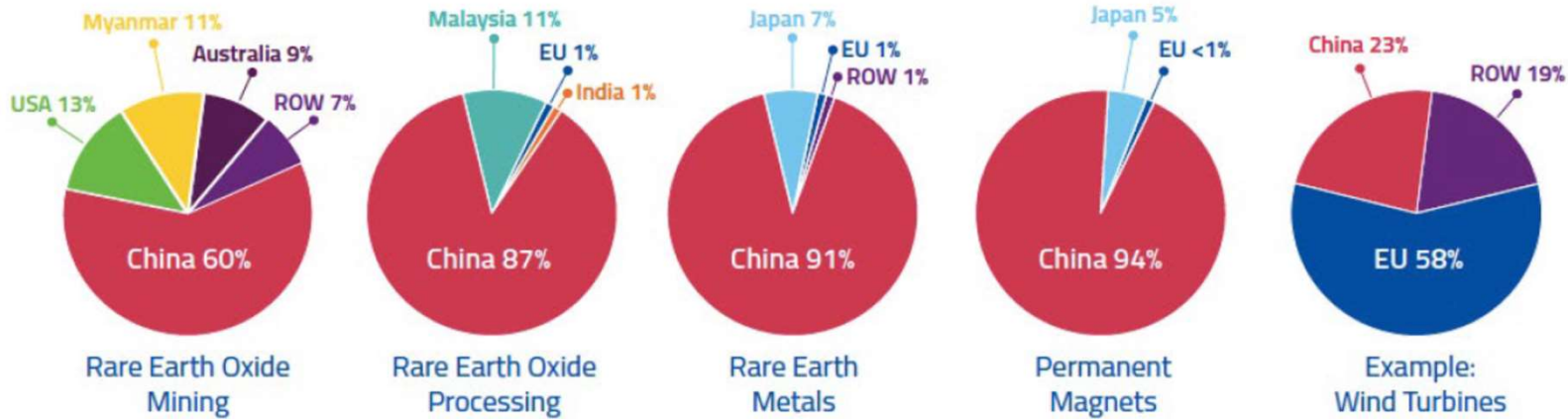
Terres rares lourdes



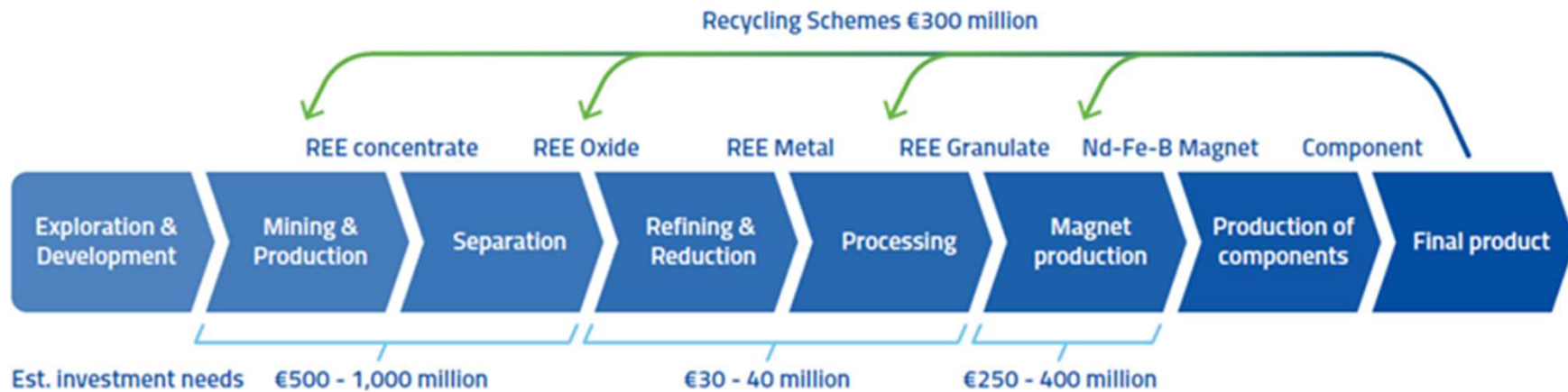
Aimants contenant 30% en masse de terres rares :

- Nd, Pr : fort risque d'approvisionnement
- Dy, Tb (jusqu'à 10 %) : peu abondants (mais 50% du prix des MP)

Chaine de la valeur des aimants permanents type NdFeB



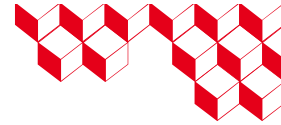
Forts enjeux d'une relocalisation en Europe de la fabrication d'aimants NdFeB



Montant des investissements pour atteindre 20% de la demande européenne en 2030 (ERMA, 2021)

EUROPEAN
RAW MATERIALS
ALLIANCE | ERMA

Objectifs RECVAL HPM

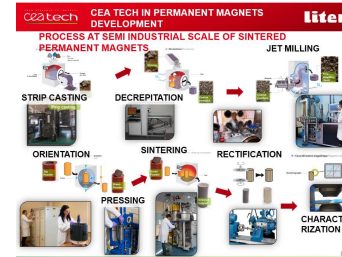
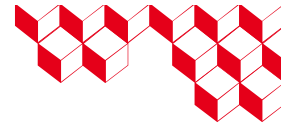


Innovative RE-use and Recycling VALue Chain for High-Power Magnets

1. Développement d'une filière spécifique pour le recyclage et la réutilisation des aimants permanents usagés
 - Meilleure connaissance des gisements de déchets
 - Développement de procédés de récupération/traitement
 - Nouveau conditionnement des plus gros aimants usages (éoliennes)
 - Recyclage en boucle fermée par refabrication de nouveaux aimants frittés ou aimants liés à partir de matières premières secondaires
 - Recyclage en boucle ouverte par la récupération des TR
2. Évaluer et assurer un équilibre économique et environnemental positif

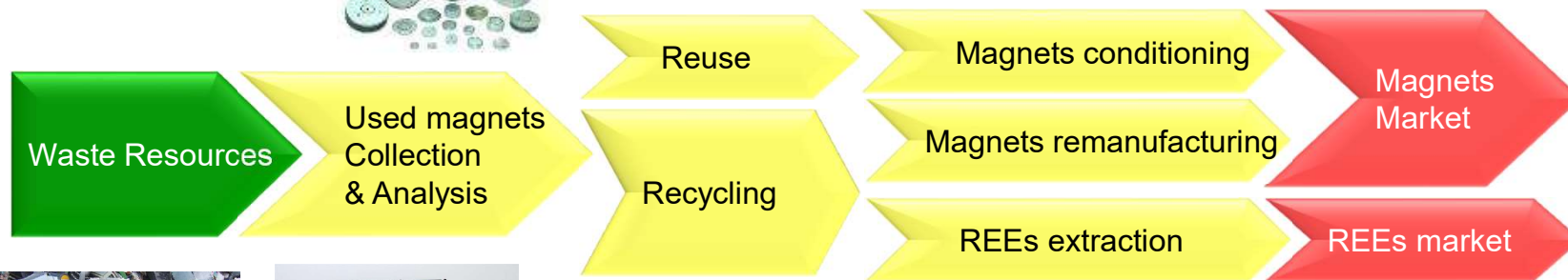


Projet RECVAL HPM



Bonded magnets
Sintered magnets

CEA Magnet development Platform



Pyrometallurgy
Electroreduction in molten salt
Hydrometallurgy processes

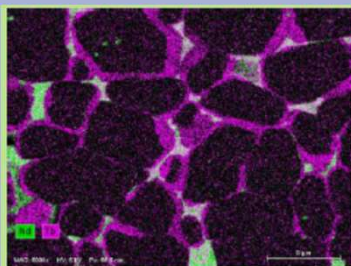
- Classical leaching & REEs recovery
- Bioleaching

Trois piliers stratégiques de l'activité aimants permanents



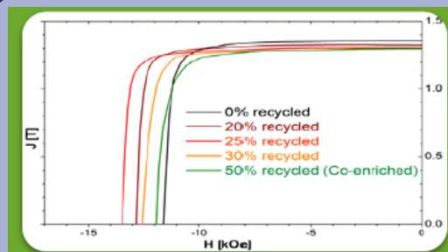
REEMPLACER avec de nouvelles compositions

Substitution Nd par Ce/La
Nouvelles phases



REDUIRE la consommation de TR

Localiser les TR lourdes (Dy) aux joints de grains
Réduction des déchets par fabrication additive

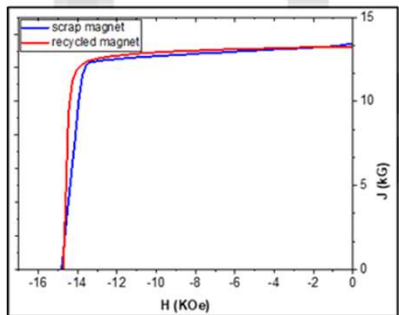
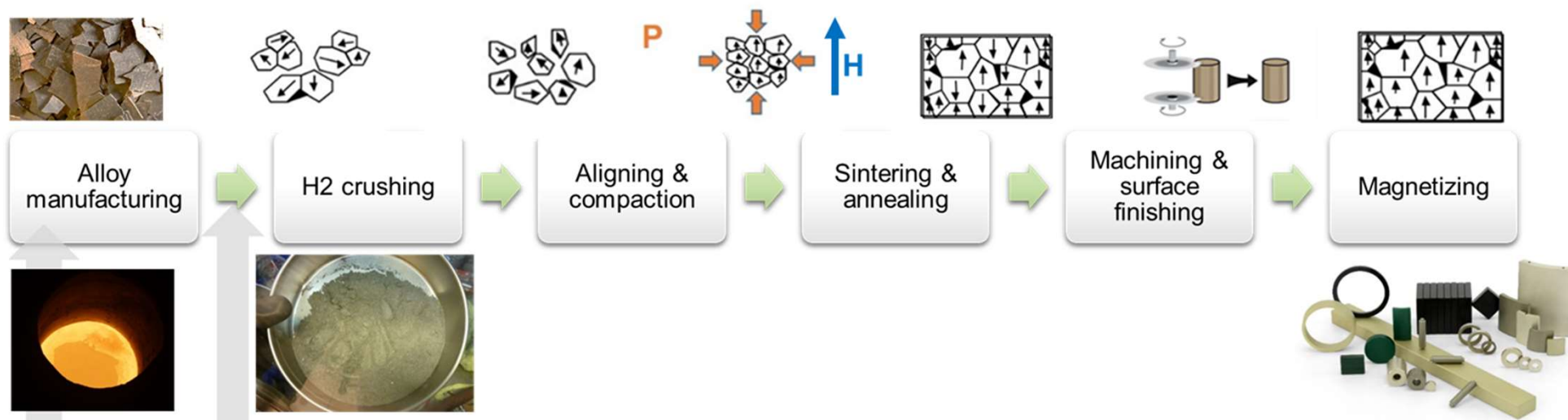


RECYCLER en boucle fermée

Aimants usagers
Rebuts de production



Recyclage des aimants en boucle fermée





 Climate-KIC is supported by the EIT, a body of the European Union

PERMAFROST

 project

Powder route

 Melting route

Scrap magnets

 ANR-RAP project

 (CEA, ICMCB, GPM)



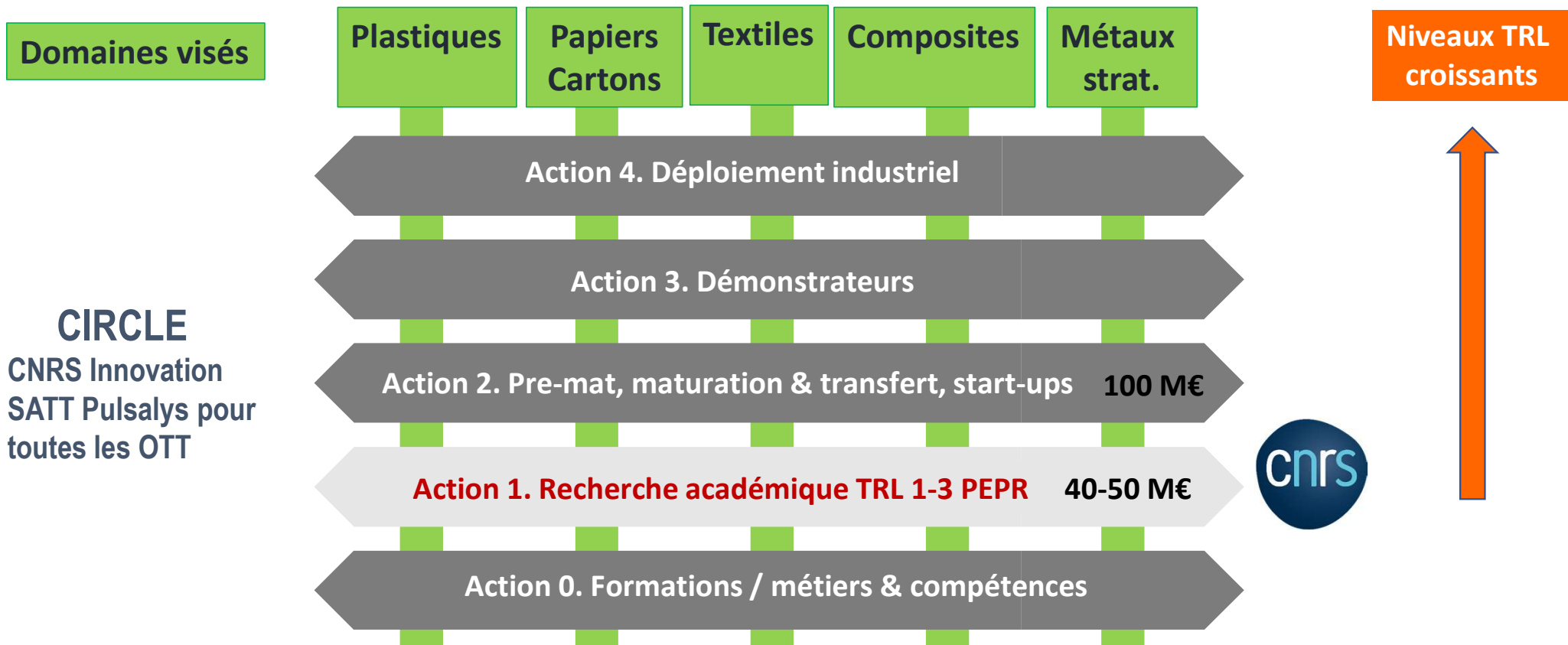
Stratégie d'accélération nationale : PEPR* & Co



Stratégie d'accélération :
« Recyclabilité, Recyclage & Réincorporation des Matériaux »

* Programme et équipement prioritaire de recherche

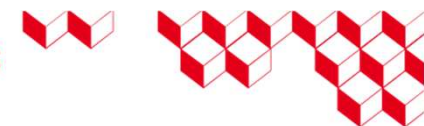
Stratégie d'Accélération Recyclabilité, Recyclage et Réincorporation de matériaux



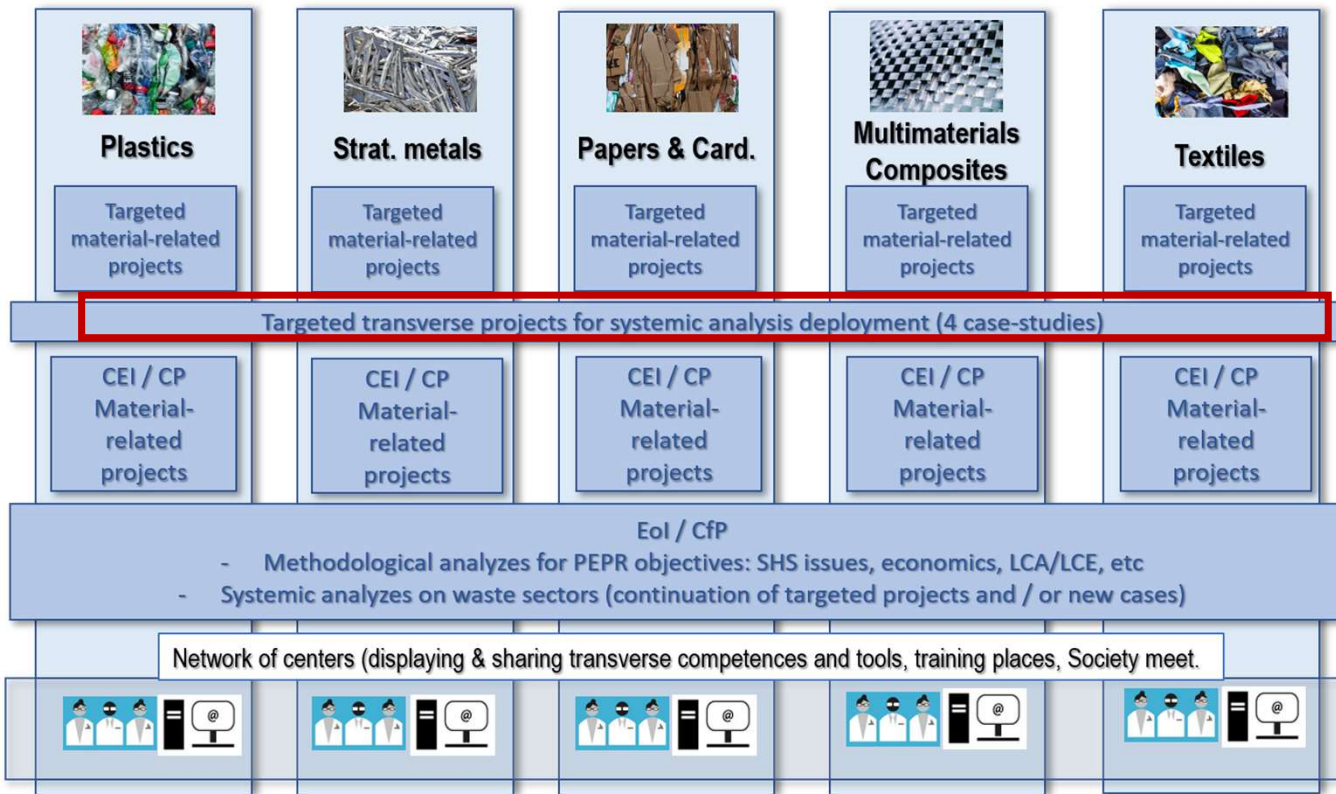
Technologies Avancées & Analyses Socio-Economiques pour la Transition Ecologique dans le Recyclage

Faire émerger un modèle français dans le domaine des matières premières de recyclage (MPR) et leur réincorporation dans de nouveaux produits.

L'objectif est de soutenir l'innovation et le déploiement des filières industrielles actuelles et futures du recyclage. La circularité des matières impose que l'ensemble des étapes soient maîtrisées et optimisées depuis la collecte de celles-ci à leur ré-intégration dans de nouveaux produits avec une empreinte environnementale et énergétique la plus faible possible. Ce programme se consacrera aux cinq classes de matériaux retenus : les plastiques, les matériaux stratégiques, les matériaux composites, les papiers-cartons et les textiles. Il déploiera également des approches holistiques qui mobiliseront plus encore les sciences numériques et les sciences humaines et sociales essentielles pour embrasser l'ensemble des volets concernés.



Structure générale du PEPR



Projets ciblés cas d'école pour développement d'approches systémiques

- Batteries
- Nouvelles Technologies pour l'Énergie (photovoltaïque, piles/électrolyseurs/stockage/transport de l'hydrogène, aimants permanents -éolien-)
- DEEE (équipements électriques et électroniques)
- Déchets ménagers -hors organiques & verre- (emballages, textiles, etc).

+ Projet 'SHS' 'Society of Re-Use & Recycling'

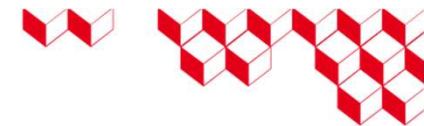


Accélérer le développement de matériaux nouveaux

DIADEM Discovery Acceleration for the Deployment of Emerging Materials

Un projet ambitieux ouvrant la voie à l'accélération de la conception et de la production de matériaux plus performants, durables et issus de matières premières non critiques et non toxiques.

L'objectif est de concevoir de nouveaux matériaux pour des spécifications données à une vitesse inaccessible dans les processus habituels de découverte. L'accélération de la conception de nouveaux matériaux nécessite l'intégration d'équipes/centres d'expertise qui combinent des plateformes de synthèse combinatoire, de mise en forme et de caractérisation à haut débit, couplées à la modélisation numérique multi-échelles, à l'exploration de données et à l'apprentissage automatique, avec l'intelligence artificielle (IA) à toutes les étapes.



CRM Act

Objectif : Il fixe des valeurs de référence claires en ce qui concerne les capacités intérieures tout au long de la chaîne d'approvisionnement en matières premières stratégiques pour diversifier l'approvisionnement de l'UE à l'horizon 2030:

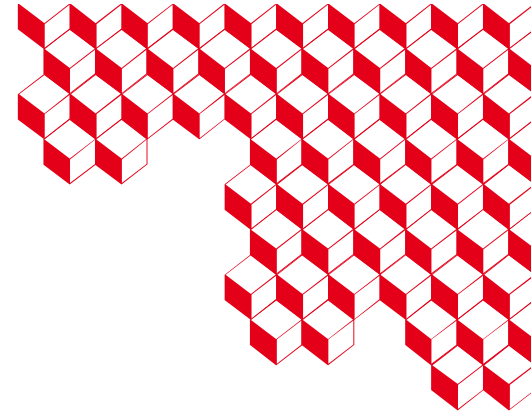
- l'extraction dans l'UE doit permettre de produire **au moins 10 % de sa consommation annuelle**,
- la transformation opérée dans l'UE doit permettre de produire **au moins 40 % de sa consommation annuelle**,
- le recyclage effectué dans l'UE doit permettre de produire **au moins 15 % de sa consommation annuelle**,
- **pas plus de 65 % de la consommation annuelle** de l'Union de chaque matière première stratégique à n'importe quel stade de transformation pertinent ne doit provenir d'un seul pays tiers.



Perspectives

- Le recyclage constitue un élément contribuant à l'approvisionnement en MS, surtout si sont favorisées (quand possibles) les voies courtes...
- ... mais cela implique un positionnement sur l'ensemble des chaînes de valeur clé
- ... mais ce n'est pas le seul : l'ouverture (et la ré-ouverture) de mines sera nécessaire tout comme l'indispensable éco-conception permettant notamment de limiter voire supprimer l'usage des MC
- Utiliser les opportunités qu'offre la dynamique actuelle (France 2030, stratégies d'accélération/PEPR, HEurope (futur potentiel lancement de PPP *Innovative Materials for EU et Raw Materials for the Green and Digital Transition*) pour innover avec les ONR, les Universités et les industriels français et européens pour une ré-industrialisation soutenable
- Intégrer judicieusement les SHS dans nos travaux





Merci