

## **2. Flux de Matières, criticité des ressources et économie circulaire**

**Pr. Nicolas PERRY**

[nicolas.perry@ensam.eu](mailto:nicolas.perry@ensam.eu)

**Tom BAUER**

[tom.bauer@ensam.eu](mailto:tom.bauer@ensam.eu)

11/04/2024

**ARTS  
ET MÉTIERS**

**ECO**  
**CONCEVOIR  
DEMAIN**

**ēdlb**<sup>+</sup>  
L'école de la batterie



## Sommes nous en capacité d'assurer les transitions nécessaires ?

14/03 : 1. Quels matériaux pour quels systèmes : vers un monde plus électrique S.Clenet – N.Perry  
*Moteur électrique*

11/04 : 2. Les Flux de Matières, criticité des ressources et économie circulaire T.Bauer – N.Perry  
*Batterie électrique*

16/05 : 3. Matériaux pour la transition et évaluation en ACV(s) C.Charbuillet – T.Reyes  
*Véhicule électrique*

### Sommaire

- I. Tour d'horizons des technos batteries et usages associés
- II. Notions de criticité et analyses de flux des batteries
- III. Les stratégies circulaires appliquées aux batteries

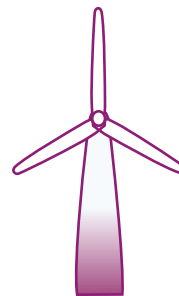




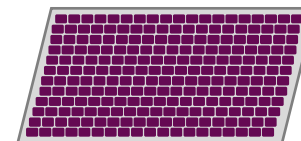
# Besoins en métaux pour la transition énergétique



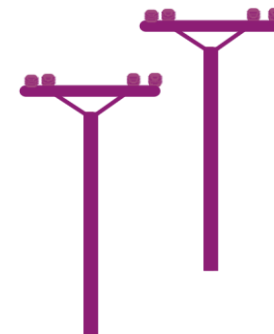
Béton, acier



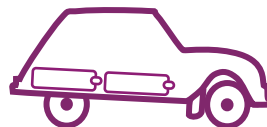
Terres rares,  
Cuivre



Silicium, Cuivre



Cuivre



Lithium, Cobalt, Cuivre

X6 du besoin en matériaux entre 2020 et 2040

[IEA – The role of critical minerals in clean energy transitions, 2021]

## Cuivre

90 % des ressources connues extraites d'ici 2050  
[IFPEN – Les métaux dans la transition énergétique]

## Lithium

5 acteurs contrôlent 90 % du marché  
[Conférence SoluCir 2023]

## Cobalt

Les besoin en FR pour le VE = 8,5 % de la production mondiale  
[RTE – Futurs énergétiques]

## Cobalt

72 % de la production en RDC  
100 % du raffinage en Chine  
[Conférence SoluCir 2023]

I. Tour d'horizons des technos batteries et usages associés

II. Notions de criticité et analyses de flux des batteries

III. Les stratégies circulaires appliquées aux batteries

# Besoins en métaux pour la transition énergétique

## → PRINCIPAUX MINERAIS UTILISÉS DANS LES ÉNERGIES À FAIBLE TENEUR EN CARBONE

	ALUMINIUM	CHROME	COBALT	CUIVRE	GRAPHITE	INDIUM	FER	PLOMB	LITHIUM	MANGANÈSE	MOLYBDÈNE	NÉODYME	NICKEL	ARGENT	TITANE	VANADIUM	ZINC	TOTAL	
ÉOLIEN																			10
SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE																			8
SOLAIRE THERMODYNAMIQUE																			2
HYDRAULIQUE																			8
GÉOTHERMIE																			6
STOCKAGE DE L'ÉNERGIE																			11

I. Tour d'horizons des technos batteries et usages associés

II. Notions de criticité et analyses de flux des batteries

III. Les stratégies circulaires appliquées aux batteries

BAUER - PERRY

# Différentes technos de batteries pour différents usages

## Batterie

## Applications

Plomb acide



Démarrage des véhicules thermiques



Nickel Cadmium



Appareil photo



Nickel Métal Hydrure



Véhicule hybride



Lithium-Ion



Smartphone, ordinateur, véhicule électrique, outils électriques, vélo, trottinettes



Lithium-polymère



Drones



Sodium-ion



En développement





















I. Tour d'horizons des technos batteries et usages associés

II. Notions de criticité et analyses de flux des batteries

III. Les stratégies circulaires appliquées aux batteries

BAUER - PERRY

# Différentes technos de batteries pour différents usages

Batterie	Applications	Avantages	Inconvénients
Plomb acide	Démarrage des véhicules thermiques 	Faible coût Peuvent être utilisées à fort courant 	Lourde Toxique Faible durée de vie 
Nickel Cadmium	Appareil photo 	Taux de décharge faible Grande durée de vie 	Très toxique Peu performante 
Nickel Métal Hydrure	Véhicule hybride 	Moins toxique Longue durée de vie 	Tendance à l'auto-décharge 
Lithium-Ion	Smartphone, ordinateur, véhicule, outils & trottinettes élec. 	Durée de vie longue Bonne performance Forte densité énergétique 	Problème de sécurité si mal utilisée 
Lithium-polymère	Drones 	Légère, flexible 	Risques explosion Fonctionne à température élevée 
Sodium-ion	En développement 	Matière première abondante Cout peu élevé 	Encore en développement 

## I. Tour d'horizons des technos batteries et usages associés

## II. Notions de criticité et analyses de flux des batteries

## III. Les stratégies circulaires appliquées aux batteries

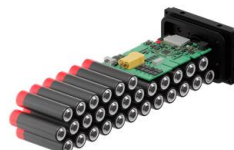
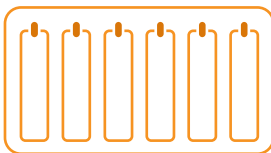
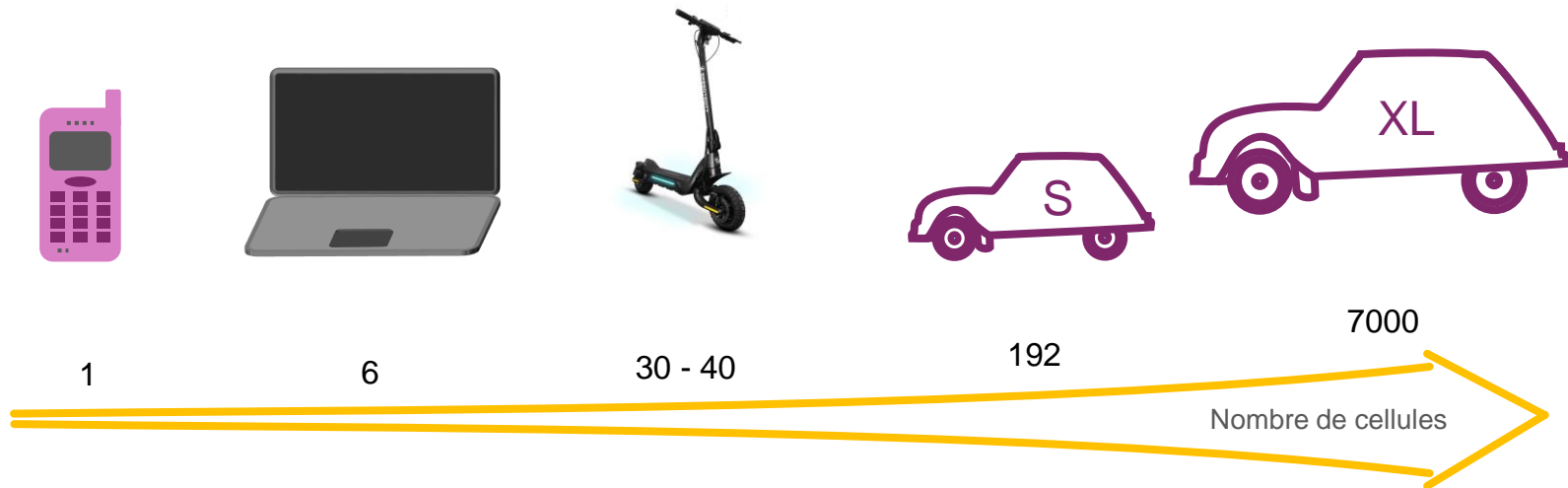
BAUER - PERRY

# Dimensionnement d'un pack batterie

## I. Tour d'horizons des technos batteries et usages associés

## II. Notions de criticité et analyses de flux des batteries

## III. Les stratégies circulaires appliquées aux batteries



BAUER - PERRY

# De la cellule au pack

## Cellules lithium-ion



Plusieurs formats :

Pouch (cellule longue) ;  
Cylindrique (format "pile") ;  
Prismatique

## Module



Les cellules sont  
assemblées par paquets  
et connectées entre elles  
électriquement

## Pack



Constitue 30% à 50% du prix  
d'un véhicule électrique (EV)

I. Tour d'horizons des  
technos batteries et  
usages associés

II. Notions de criticité  
et analyses de flux des  
batteries

III. Les stratégies circu-  
laires appliquées aux  
batteries

BAUER - PERRY

# De la cellule au pack

- I. Tour d'horizons des technos batteries et usages associés
- II. Notions de criticité et analyses de flux des batteries
- III. Les stratégies circulaires appliquées aux batteries

BAUER - PERRY

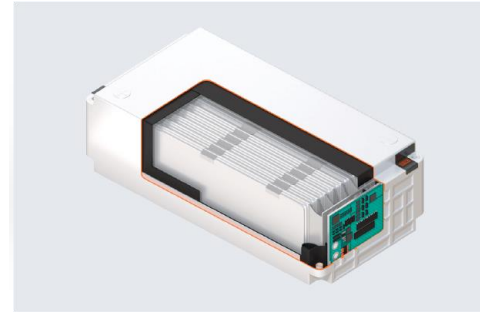
## Cellules lithium-ion



Plusieurs formats :

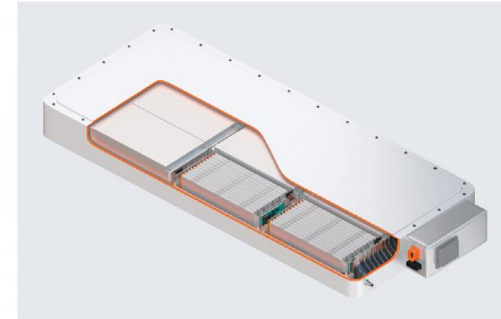
Pouch (cellule longue) ;  
Cylindrique (format "pile") ;  
Prismatique

## Module



Les cellules sont  
assemblées par paquets  
et connectées entre elles  
électriquement

## Pack



Constitue 30% à 50% du prix  
d'un véhicule électrique (EV)

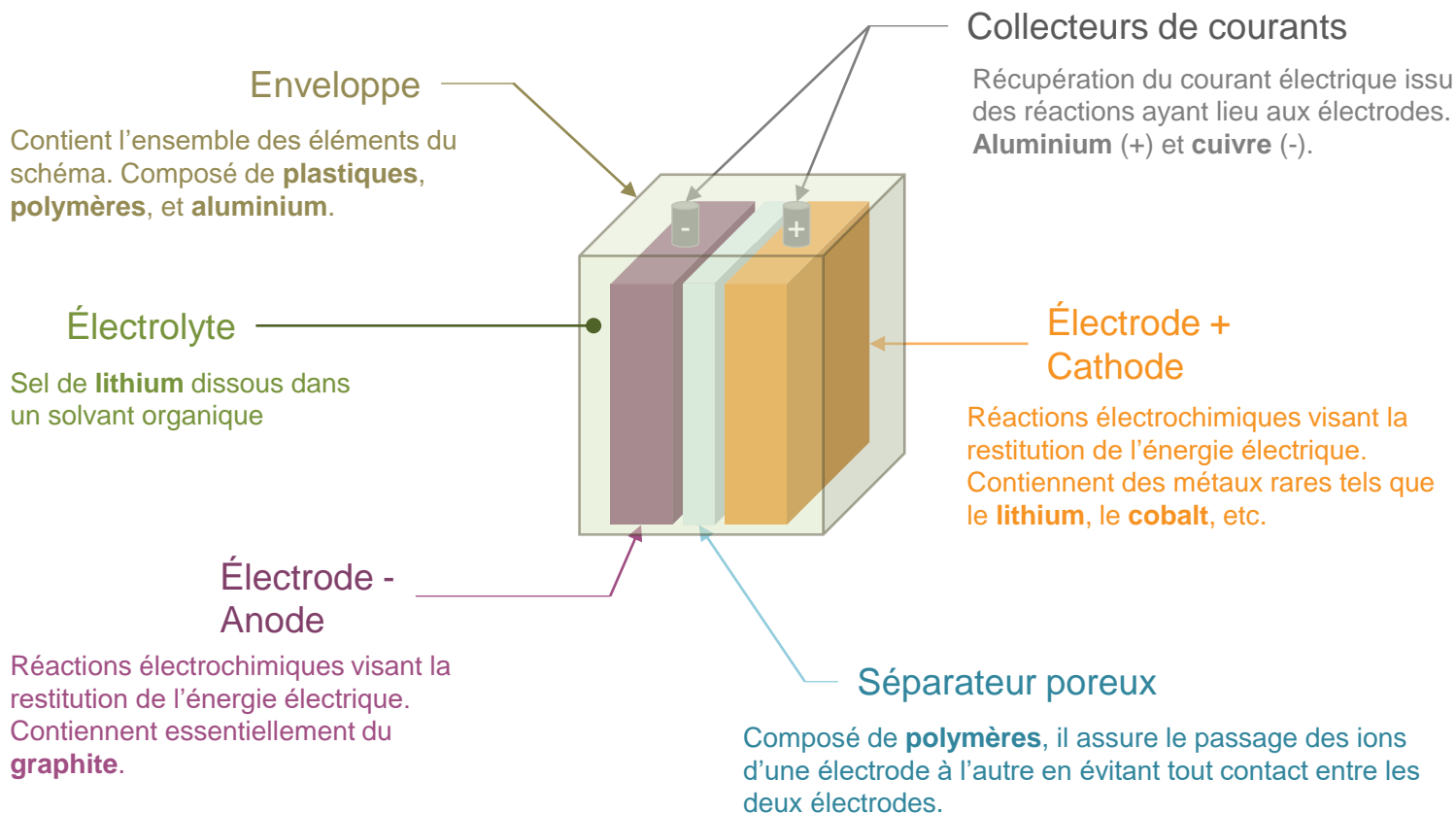
# La cellule en détail

## I. Tour d'horizons des technos batteries et usages associés

## II. Notions de criticité et analyses de flux des batteries

## III. Les stratégies circulaires appliquées aux batteries

BAUER - PERRY



# 5<sup>e</sup> liste des Matériaux Critiques (CRM) en Europe (2023)

2023 Critical Raw Materials and *Strategic Raw Material		
★ Aluminium / Bauxite	Hafnium	Phosphate rock
Antimony	<b>Helium</b>	Phosphorus
<b>Arsenic</b>	Heavy Rare Earth Elements	Scandium
Baryte	★ Lithium	Silicon Metal
Beryllium	Light Rare Earth Elements	Strontium
Bismuth	Indium	Tantalum
Boron / Borate	Magnesium	Titanium Metal
★ Cobalt	<b>Manganese</b>	Tungsten
Coking Coal	★ Natural Graphite	Vanadium
Fluorspar	Natural Rubber	
Gallium	Niobium	★ <b>*Copper</b>
Germanium	Platinum Group Metals	<b>*Nickel</b>

[http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical\\_en](http://ec.europa.eu/growth/sectors/raw-materials/specific-interest/critical_en)

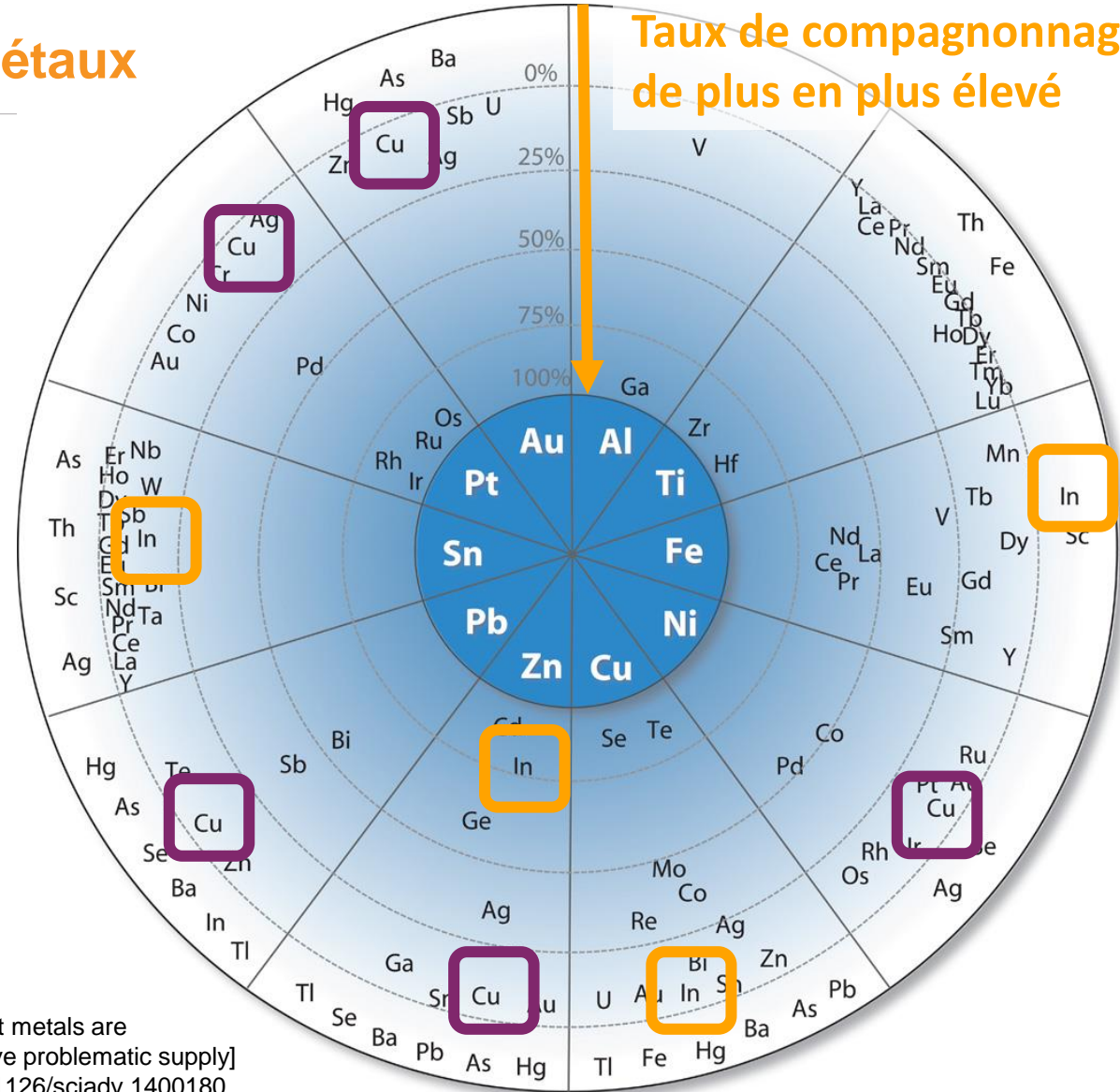
Deux critères de définition

Importance économique  
Risque d'approvisionnement

- I. Tour d'horizons des technos batteries et usages associés
- II. Notions de criticité et analyses de flux des batteries
- III. Les stratégies circulaires appliquées aux batteries

# Roue des métaux

Taux de compagnonnage de plus en plus élevé



- I. Tour d'horizons des technos batteries et usages associés
- II. Notions de criticité et analyses de flux des batteries
- III. Les stratégies circulaires appliquées aux batteries

BAUER - PERRY

[Nassar et al., 2015 - By-product metals are technologically essential but have problematic supply]  
<https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.1400180>

## Extraction du cuivre dans le centre de la Roumanie (2e plus grande mine d'Europe)

- Ouverture en 1978, production de Cu en 1983
- Production annuelle moy : 11 kt (27 kt en 2021)
- Périmètre d'exploitation : 21,9 km<sup>2</sup> (≈ Chambéry)
- Bassin de décantation : 1,3 km<sup>2</sup> (+ 1cm / an)

<https://www.systemx.org/node/694>

<https://www.globaldata.com/data-insights/mining/romania--five-largest-surface-mines-in-2090849>

<https://journals.openedition.org/rge/1839?lang=en>

**Taux de croissance du marché : 3% / an  
=> Doublement tous les 20 ans.**

Concentration dans les mines entre 0.5 et 0.8%  
(exploitable économiquement jusqu'à 0.15%)  
[A. MEGE-REVIL, Centrale Lille]



[Imagery ©2016 CNES / Astrium, Map data © 2016 Google, prise de vue le 07/09/2016]



Cristian Bortes, CC BY 2.0, via Wikimedia Commons

Lien :

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ro%C8%99ia\\_Poieni\\_open-pit\\_copper\\_mine.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ro%C8%99ia_Poieni_open-pit_copper_mine.jpg)

## Extraction de lithium en Auvergne

- Ouverture prévue en 2027
- 34'000 tonnes de lithium → soit 700'000 véhicules électriques
- Trou entre 75 et 300 mètres de prof.
- 1t Li  $\cong$  100 tonnes de roches excavées
- À venir également une usine de purification des minéraux et de transformation en hydroxyde de lithium



Standard "IRMA", visant la réduction des rejets toxiques et la minimisation de la consommation d'eau

Estimations Imerys :

8 kg éq. CO<sub>2</sub> / t de Li en FR    16-20 kg éq. CO<sub>2</sub> / t de Li en AU ou CN

8 tonnes éq. CO<sub>2</sub> / t Li ?



La carrière de Beauvoir, dans l'Allier, va devenir l'un des principaux lieux d'extraction de lithium en Europe. - Imerys

[<https://www.radiofrance.fr/franceinter/l-une-des-plus-grandes-mines-europeennes-de-lithium-va-ouvrir-en-france-d-ici-2027-3063449>]

I. Tour d'horizons des technos batteries et usages associés

II. Notions de criticité et analyses de flux des batteries

III. Les stratégies circulaires appliquées aux batteries

BAUER - PERRY

## Épuisé d'ici aux 50 prochaines années

- Au (Or) - contacts électroniques : conducteur inoxydable, inaltérable

## Épuisés d'ici les 50 à 100 prochaines années

- Cu (Cuivre) - industrie électrique (câbles, bobinages), industrie électronique
- Ni (Nickel) - batteries (piles bouton pour BIOS, batteries d'ordinateurs portables), EEE, acier inoxydable, alliages ferreux et non ferreux, galvanoplastie
- Al (Alliages d'aluminium) - transport (automobiles, avions, camions, wagons, navires, etc.) ; emballage (boîtes de conserve, papier d'aluminium, etc.) ; construction (fenêtres, portes, revêtements, etc.) ; biens de consommation durables (appareils électroménagers, ustensiles de cuisine, etc.) ; lignes de transmission électrique ; machines

[UNEP (2013) Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. van der Voet, E.; Salminen, R.; Eckelman, M.; Mudd, G.; Norgate, T.; Hischier, R.]

[Dodson et al. (2012), Elemental sustainability: Towards the total recovery of scarce metals. Chemical Engineering and Processing 51 (2012) 69-78 cité sur <https://ecoinfo.cnrs.fr/2014/03/11/1-epuisement-des-ressources-naturelles/>]

## Autre élément d'importance pour les batteries

- Co (Cobalt) - électrodes de batteries rechargeables ; superalliages ; coussins gonflables de sécurité pour automobiles ; catalyseurs pour les industries pétrolière et chimique ; carbures cimentés (également appelés métaux durs) et outils diamantés ; alliages résistant à la corrosion et à l'usure ; agents de séchage pour peintures, vernis et encres ; teintures et pigments ; aciers rapides ; supports d'enregistrement magnétique ; aimants

### Facteurs considérés pour définir ces seuils :

"rythme des découvertes, réserves plus ou moins réelles, secret entourant des ressources stratégiques, fluctuation du niveau de consommation, de l'activité économique mondiale, émergence de nouvelles technologies d'extraction, émergence de nouveaux produits consommateurs de ressources, cataclysmes ou conflits affectant la production, spéculation,..."

[UNEP (2013) Environmental Risks and Challenges of Anthropogenic Metals Flows and Cycles, A Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. van der Voet, E.; Salminen, R.; Eckelman, M.; Mudd, G.; Norgate, T.; Hischier, R.]

[Dodson et al. (2012), Elemental sustainability: Towards the total recovery of scarce metals. Chemical Engineering and Processing 51 (2012) 69-78 cité sur <https://ecoinfo.cnrs.fr/2014/03/11/1-epuisement-des-ressources-naturelles/>]

# Taux de recyclage des métaux

« EOL-RR for sixty metals: The periodic table of global average end-of-life (post-consumer) functional recycling (EOL-RR) for sixty metals. Functional recycling is recycling in which the physical and chemical properties that made the material desirable in the first place are retained for subsequent use. [It includes recycling as a pure metal (e. g., copper) and as an alloy (e. g., brass).] Unfilled boxes indicate that no data or estimates are available, or that the element was not addressed as part of this study. These evaluations do not consider metal emissions from coal power plants »

[Recycling rates of metals, UNEP, 2011]  
[LIEN](#)

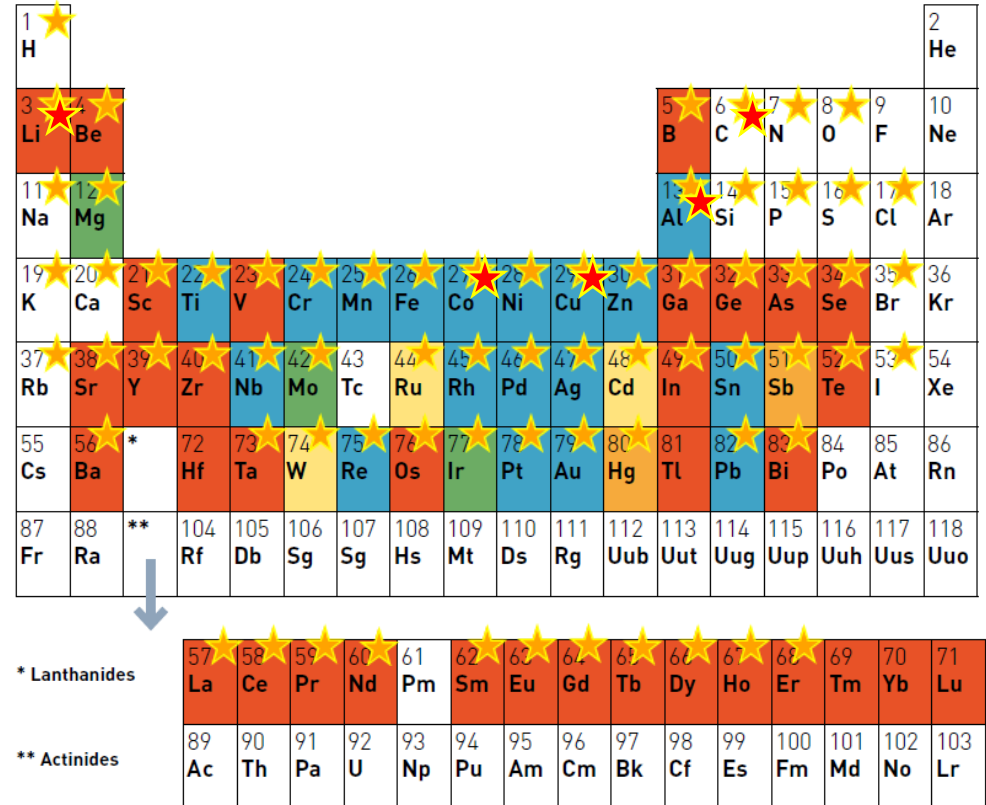
Couplé avec des infos de

[Deubzer et al., 2019] :  
 ★ = éléments présents dans les EEE

[EDLB, 2024] :  
 ★ = éléments présents dans les cellules Li-ion

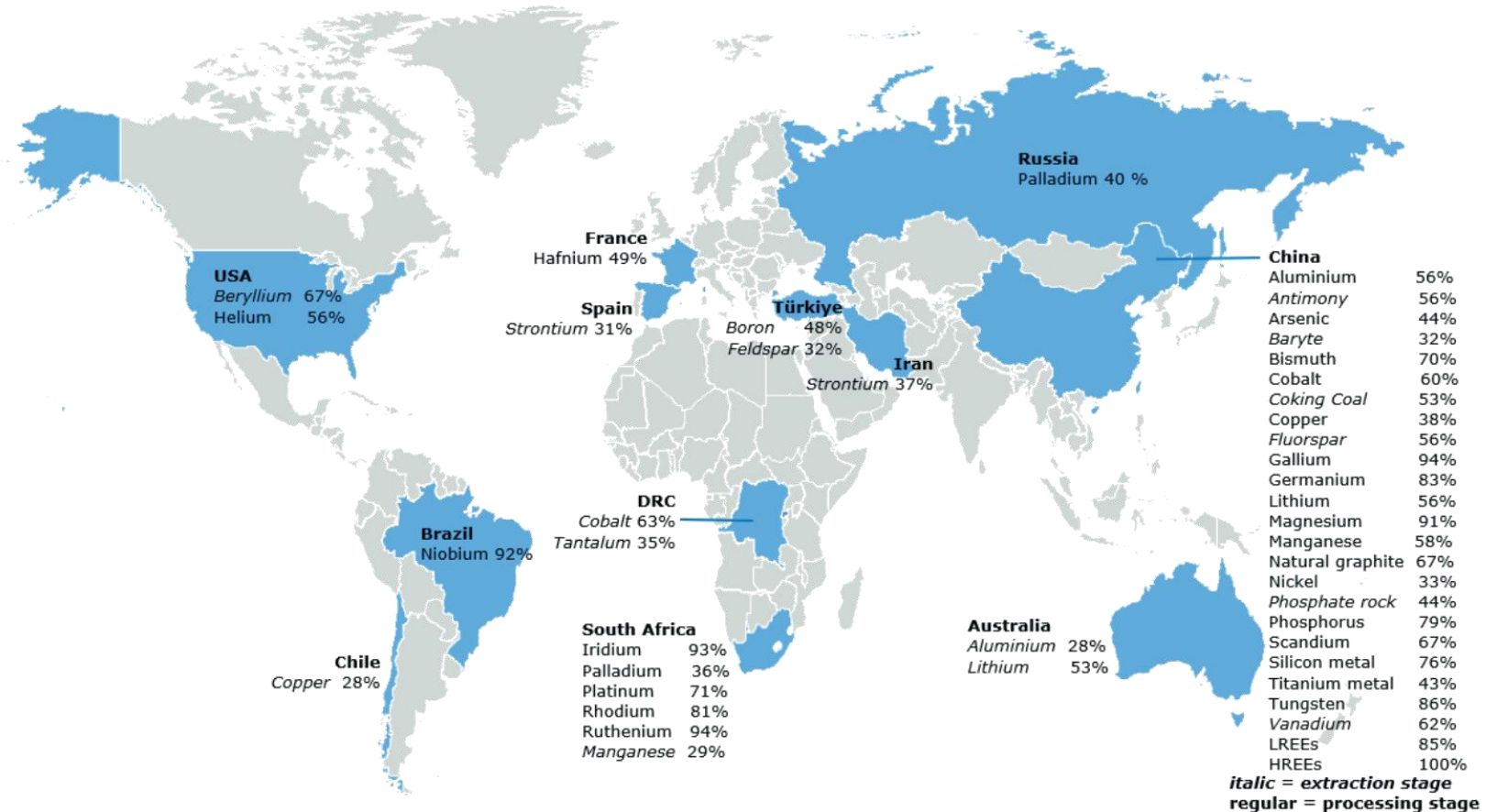
**Proposition de réglementation européenne (16 mars 2023) sur les métaux critiques pour :**

- Prévenir des futures tensions
  - Sécuriser les appros
  - Aller vers une gestion soutenable
- |  |          |
|--|----------|
|  | > 50%    |
|  | > 25-50% |
|  | > 10-25% |
|  | 1-10%    |
|  | < 1%     |



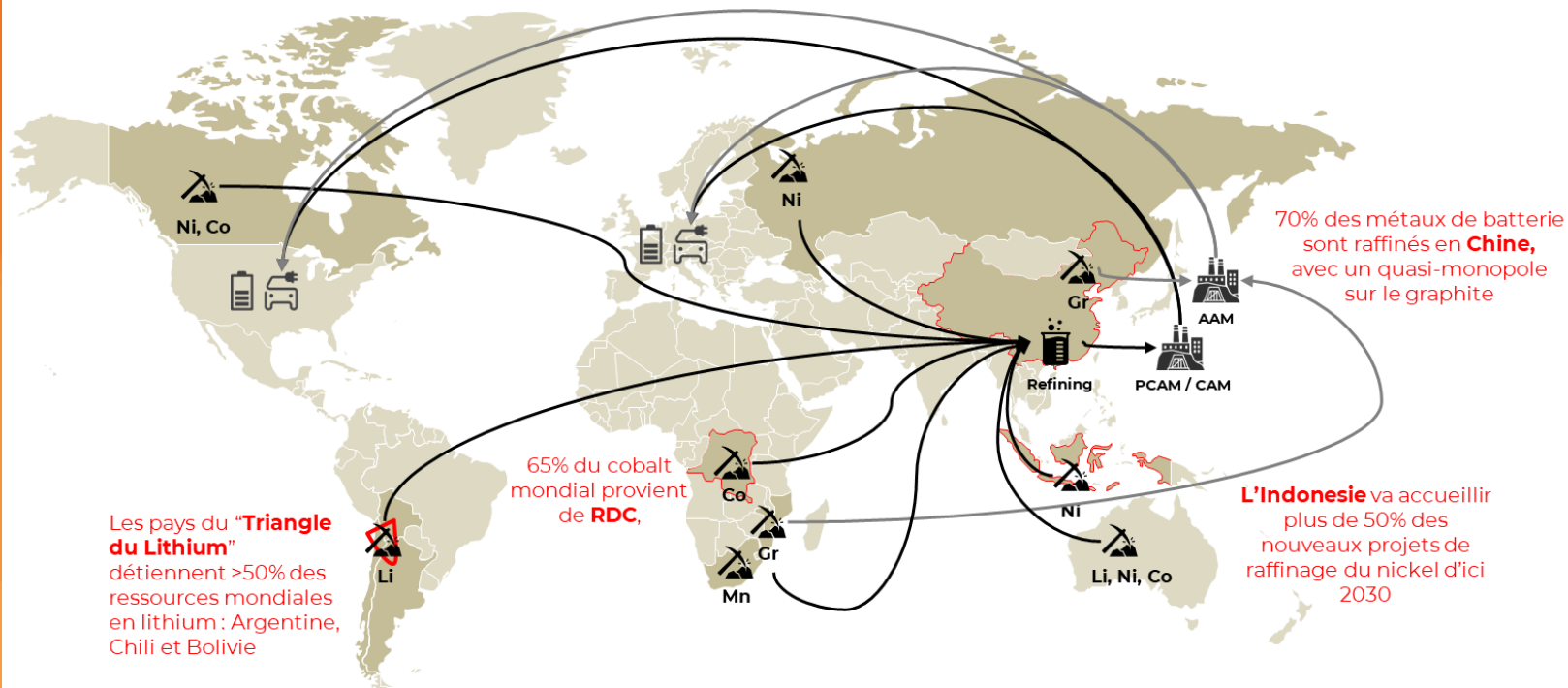
# Les métaux critiques vus de l'Europe

- I. Tour d'horizons des technos batteries et usages associés
- II. Notions de criticité et analyses de flux des batteries
- III. Les stratégies circulaires appliquées aux batteries



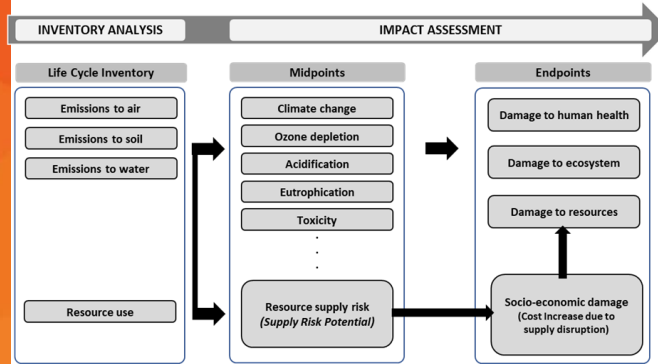
# La chaîne d'approvisionnement des batteries aujourd'hui

- I. Tour d'horizons des technos batteries et usages associés
- II. Notions de criticité et analyses de flux des batteries
- III. Les stratégies circulaires appliquées aux batteries



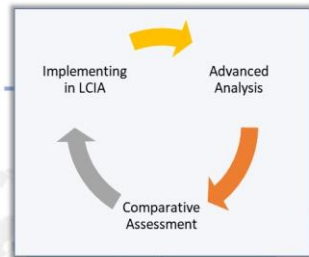
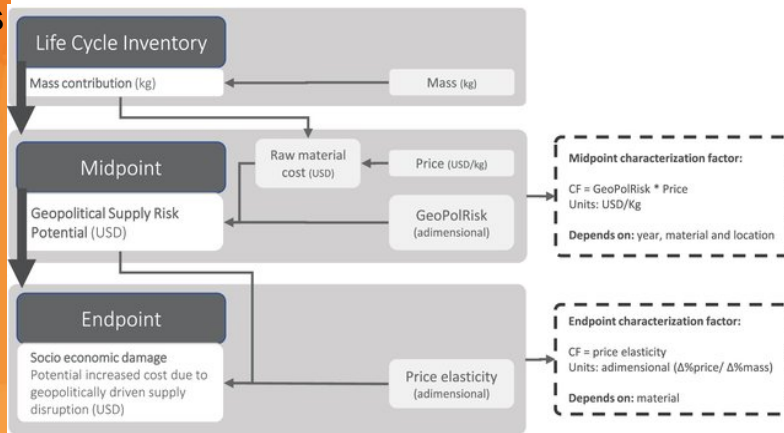
BAUER - PERRY

# GeopolRisk .. indicateurs en ACV



Indicateur de risque d'approvisionnement lié à la géopolitique (end point)

Basé sur un Facteur de caractérisation de l'indicateur (mid point) "Potentiel de risque d'approvisionnement"



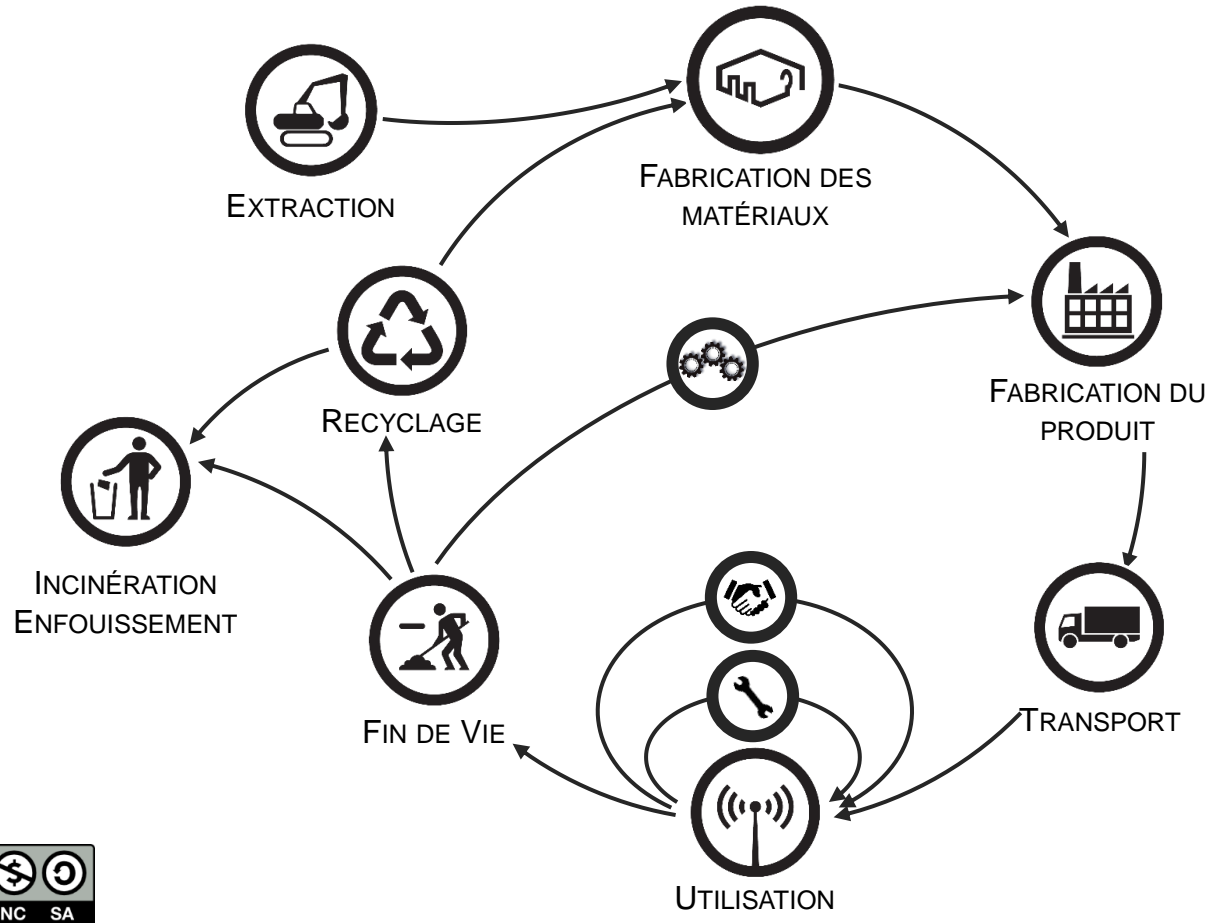
- I. Tour d'horizons des technos batteries et usages associés
- II. Notions de criticité et analyses de flux des batteries
- III. Les stratégies circulaires appliquées aux batteries

BAUER - PERRY

Santillán-Saldivar, J., Gemechu, E., Muller, S. *et al.* An improved resource midpoint characterization method for supply risk of resources: integrated assessment of Li-ion batteries. *Int J Life Cycle Assess* 27, 457–468 (2022)

# Autour du cycle de vie

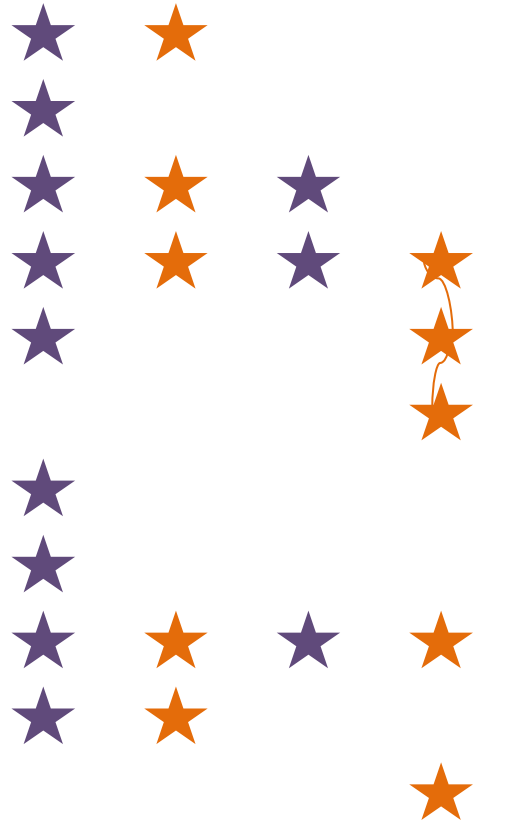
- I. Tour d'horizons des technos batteries et usages associés
- II. Notions de criticité et analyses de flux des batteries
- III. Les stratégies circulaires appliquées aux batteries



adapté de [Bauer, Tom. Concevoir un produit pour plusieurs vies : Propositions pour la conception et l'évaluation environnementale de solutions en cascade. Université Grenoble Alpes, 2018]

# Les xR

9R    5R    3R    DEEE



Refuser (refuse)

Reconcevoir (rethink)

Réduire (reduce)

Réutiliser (reuse)

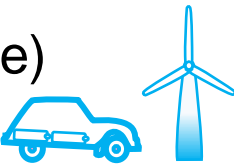
Réparer (repair)



Remettre à niveau (refurbish)

Remanufacturer (remanufacture)

Réorienter l'usage (repurpose)



Recycler (recycle) => T<sub>EOL-RR</sub> limité

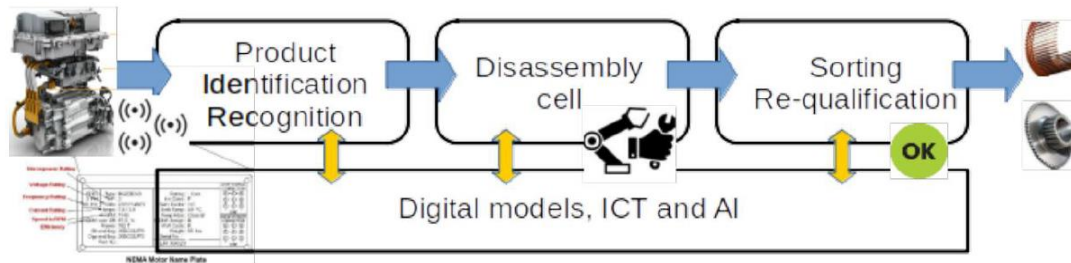
Rendre à la terre (ou composter, rot)

Valorisation énergétique (recover)

- I. Tour d'horizons des technos batteries et usages associés
- II. Notions de criticité et analyses de flux des batteries
- III. Les stratégies circulaires appliquées aux batteries

BAUER - PERRY

# Lien recherche SDC2



**Smart Disassembly Cell for Circularity**  
 Economie Circulaire 4.0 = Industrie 4.0  
 pour la circularité

Fin de vie =  
 préparation Prod. / Mat.  
 +  
 recyclage Mat.  
 ou réusage de  
 composants ou refabrication



Prod. Identification  
 Recognition  
 Digitalisation  
 Diagnostic

Product  
 Disassembly  
 Agile process

Items Sorting  
 Re-qualification

Identifier / diagnostiquer  
 / reconstruire

Desassembler

Requalifier

Sécuriser

DATA and AI

Data and AI



Data Base :  
 - Prod.  
 - Component  
 - Materials  
 - Assembly

Component ID,  
 Qualif card  
 EoL options



- I. Tour d'horizons des technos batteries et usages associés
- II. Notions de criticité et analyses de flux des batteries
- III. Les stratégies circulaires appliquées aux batteries

BAUER - PERRY

- I. Tour d'horizons des technos batteries et usages associés
- II. Notions de criticité et analyses de flux des batteries
- III. Les stratégies circulaires appliquées aux batteries

## Conclusions

BAUER - PERRY

## Conclusions

---

- Les questions de criticité ne peuvent aller qu'en augmentant
- Les enjeux de souveraineté sont de plus en plus marqués
- Le recyclage n'est pas **la** solution
  
- Nécessité de diversifier les solutions autour de la mobilité
- Besoin de davantage de sobriété dans nos usages et modes de consommations

## 2. Flux de Matières, criticité des ressources et économie circulaire

**MERCI**

**Pr. Nicolas PERRY**

**Tom BAUER**

[nicolas.perry@ensam.eu](mailto:nicolas.perry@ensam.eu)

[tom.bauer@ensam.eu](mailto:tom.bauer@ensam.eu)

11/04/2024

**ARTS  
ET MÉTIERS**

**ECO  
CONCEVOIR  
DEMAIN**

**ēdlb**<sup>+</sup>  
L'école de la batterie

