

Peut-on concilier électronique de puissance et soutenabilité ?

Peut-on concilier électronique de puissance et soutenabilité ?



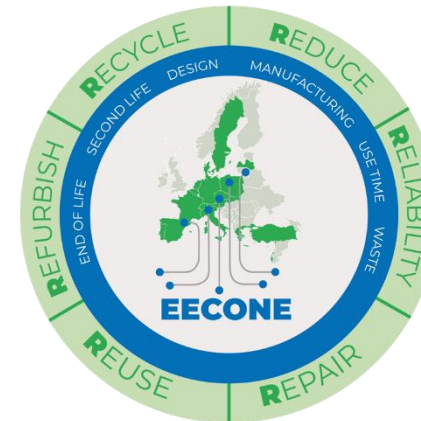
Jean-Christophe CREBIER

Directeur de recherche / G2ELAB



Thibault ABRY

Ingénieur de recherche / G2ELAB



Electronique de puissance

Electronique de puissance

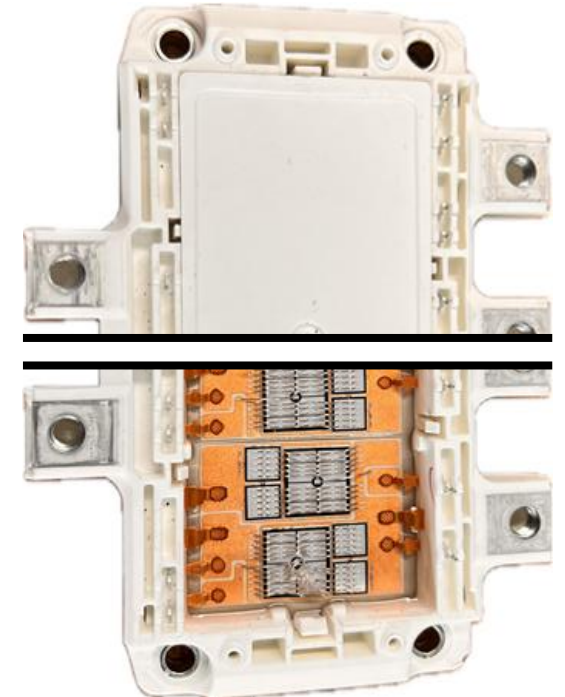
Question : savez-vous ce qu'est l'électronique de puissance ?



Véhicule électrique



Alimentation serveur



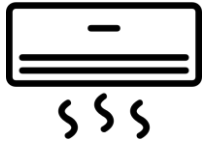
Module de puissance

Electronique de puissance

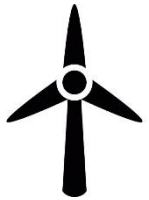
L'EP est un pilier de la décarbonation de l'énergie



Mobilité électrique et *vehicle to grid*



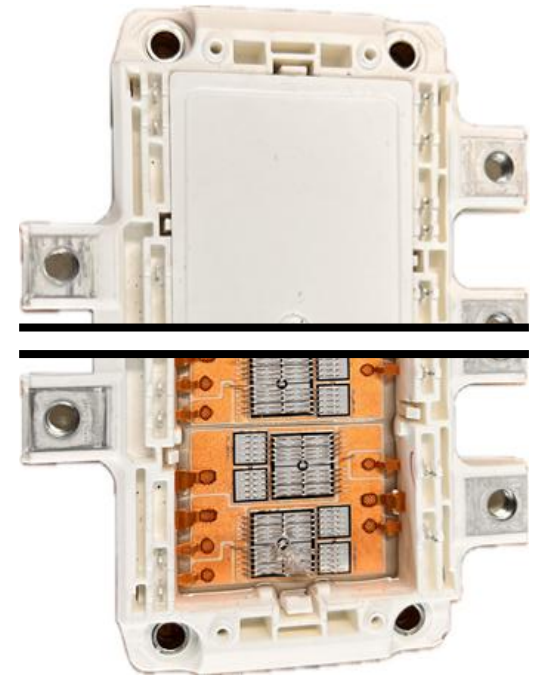
Chauffage et climatisation



Energies renouvelables

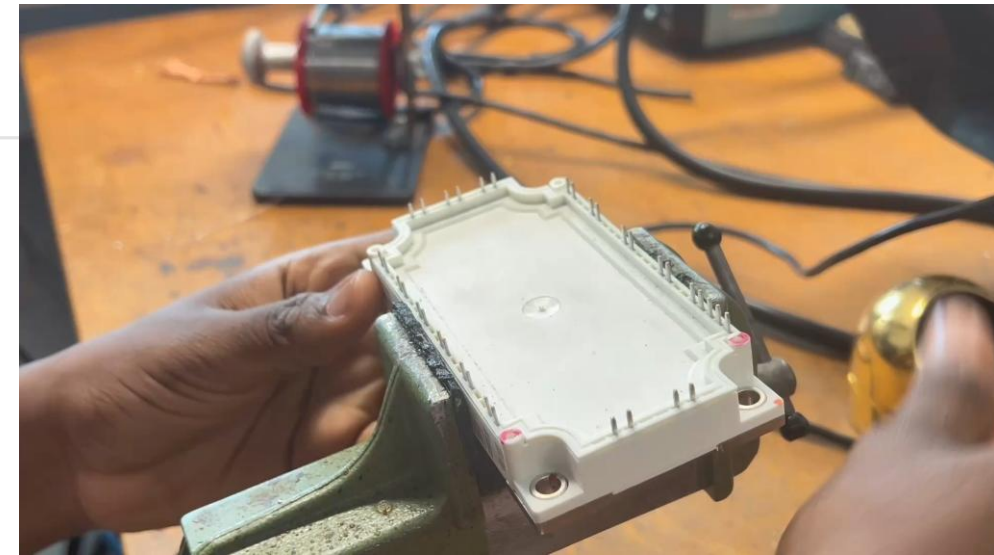


Densité de puissance et rendement élevés, coûts maîtrisés

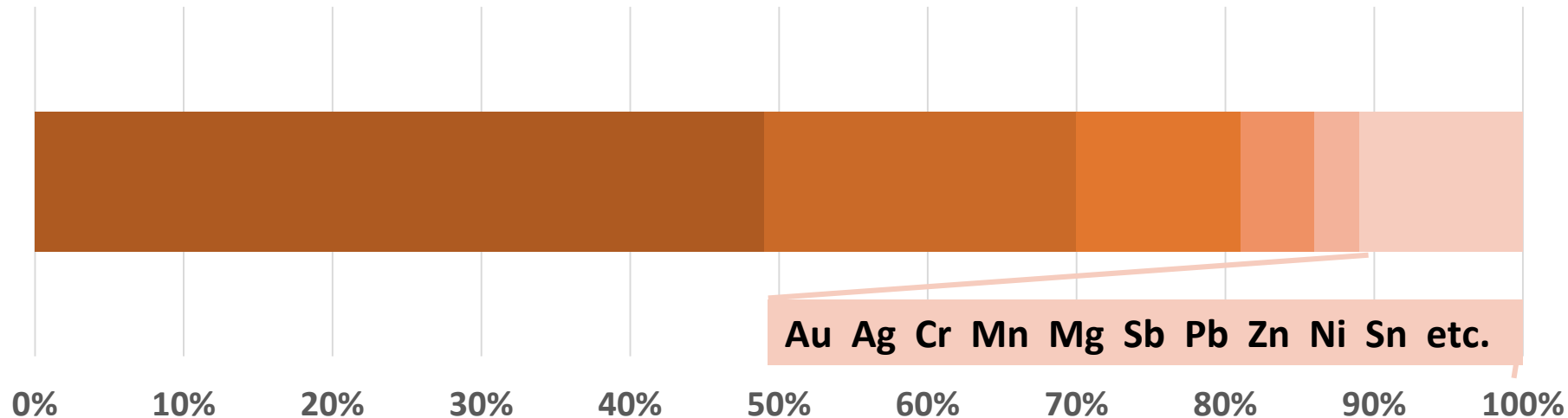


Electronique de puissance

Composition moyenne simplifiée d'un module de puissance



■ Cu ■ Plastique ■ Gel silicone ■ AlSiC ■ Acier ■ Autre



Objet complexe, conçu pour la performance et non démontable

J. Liu, et al., travaux en cours, Grenoble INP

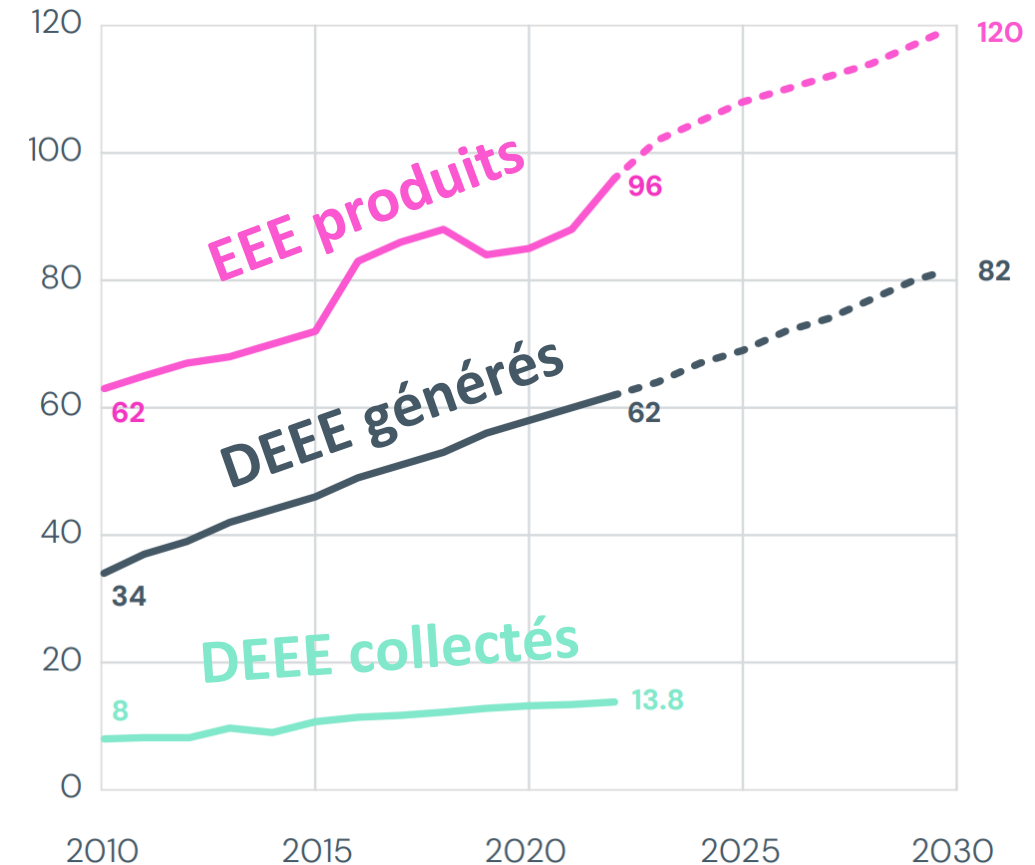
Déchets électriques et électroniques

Déchets électriques et électroniques

DEEE: *Déchets d'Equipements Electriques et Electroniques*

Question : en 2022, combien de tonnes de DEEE ont été produits dans le monde ?

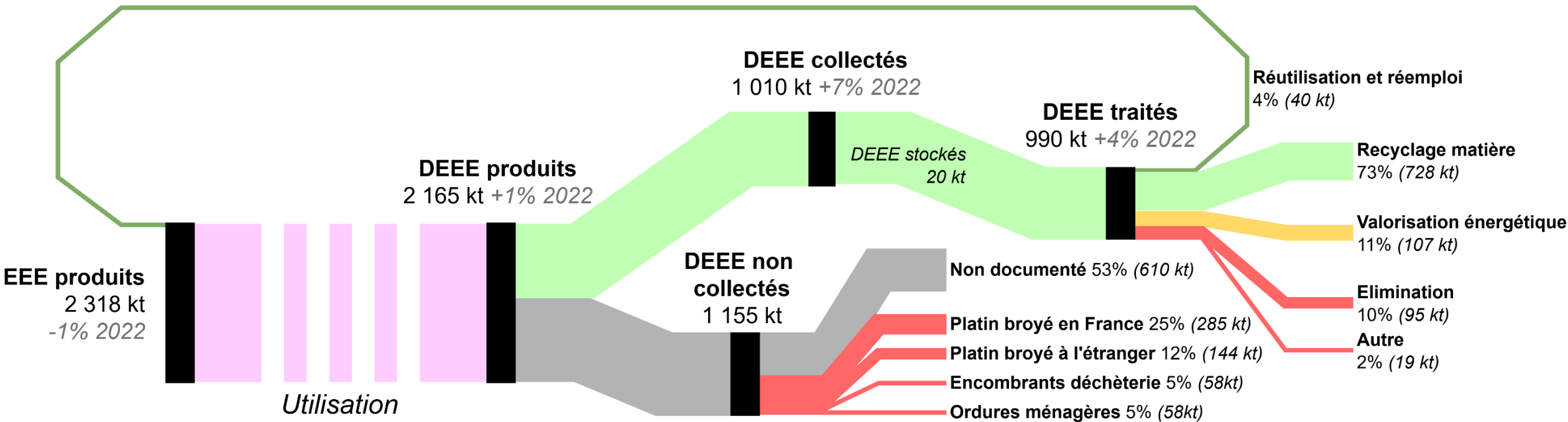
62 Mt dont **31 Mt** de métaux et **17 Mt** de plastiques



Cornelis P. Baldé, et al., "Global E-waste Monitor 2024", International Telecommunication Union and United Nations Institute for Training and Research, 2024.

Déchets électriques et électroniques

Flux de déchets d'équipement électriques et électroniques (DEEE) en France en 2023



B. Victoria, et al., "Rapport annuel 2023 équipements électriques et électroniques", ADEME, Mai 2025.
V. Monier, et al., "Rapport annuel 2012 équipements électriques et électroniques", ADEME, Septembre 2013.
L. Pinto, et al., travaux en cours, Grenoble INP.

Recyclage matière ≠ réincorporation

Déchets électriques et électroniques

Recyclage matière ≠ réincorporation

Métal	Collecte	Incorporation en France	Incorporation non Française	Explication
Acier	9599 kt	4528 kt (47%)	5071 (53%)	Exigences sur les teneurs
Aluminium	734 kt	473 kt (64%)	261 kt (36%)	Diversité des alliages
Cuivre	280 kt	111 kt (40%)	169 kt (60%)	Consommation énergétique de l'affinage
Plastique (DEEE)	128 kt	51 kt (40%)	Enfouissement et incinération 77 kt (60%)	Tri difficile et additifs

E. Harscoët, et al., "Gisement de déchets plastiques pouvant être traités par recyclage chimique et physico-chimique en France", ADEME, Nov. 2022.

P. Drapeau, et al., "Etude du potentiel d'amélioration du recyclage des métaux en France - Etat des lieux du recyclage de l'acier, de l'aluminium et du cuivre en France et plan d'action", ADEME, Dec. 2023.

Des performances et caractéristiques très contrastées

Recyclage matière \neq réincorporation

Question : Rendements d'un onduleur PV (en %) ?

Entre 97 et 99% Pour rappel, on ne peut pas aller au delà de 100% ☹️

Question : Quantités de matières régénérées (même fonctionnalité) (en %) ?

Entre 0 et 5% Pour rappel, on ne peut pas aller en dessous de 0% 😊

Question : Croissance du marché de l'électronique de puissance (en %) ?

Entre 5% et 15%

Question : Croissance des taux de collecte des DEEE dans le monde (en %) ?

moins 1 à 2%

Enjeux et soutenabilité

Enjeux et soutenabilité

- L'électronique de puissance est un pilier de la **décarbonation** de l'énergie.
- **Forte croissance** mondiale des EEE et inévitablement des DEEE.
- Taux de collecte Français < 50%, taux de **recyclage effectif < 34%**, taux d'incorporation effectif encore plus bas car :
 - **Démontage** non viable dans le cas des modules de puissance.
 - Difficulté du **tri** des plastiques.
 - **Hétérogénéité** des métaux rend impossible le recyclage en boucle fermée.

La quête de la performance et les ruptures technologiques contribuent à l'hétérogénéité des systèmes, composants et matériaux, accélèrent l'obsolescence et diminuent voire, rendent impossible la circularité !!

Soutenabilité: *«Satisfaction des besoins des générations présentes, sans compromettre la satisfaction des besoins des générations futures.»* –

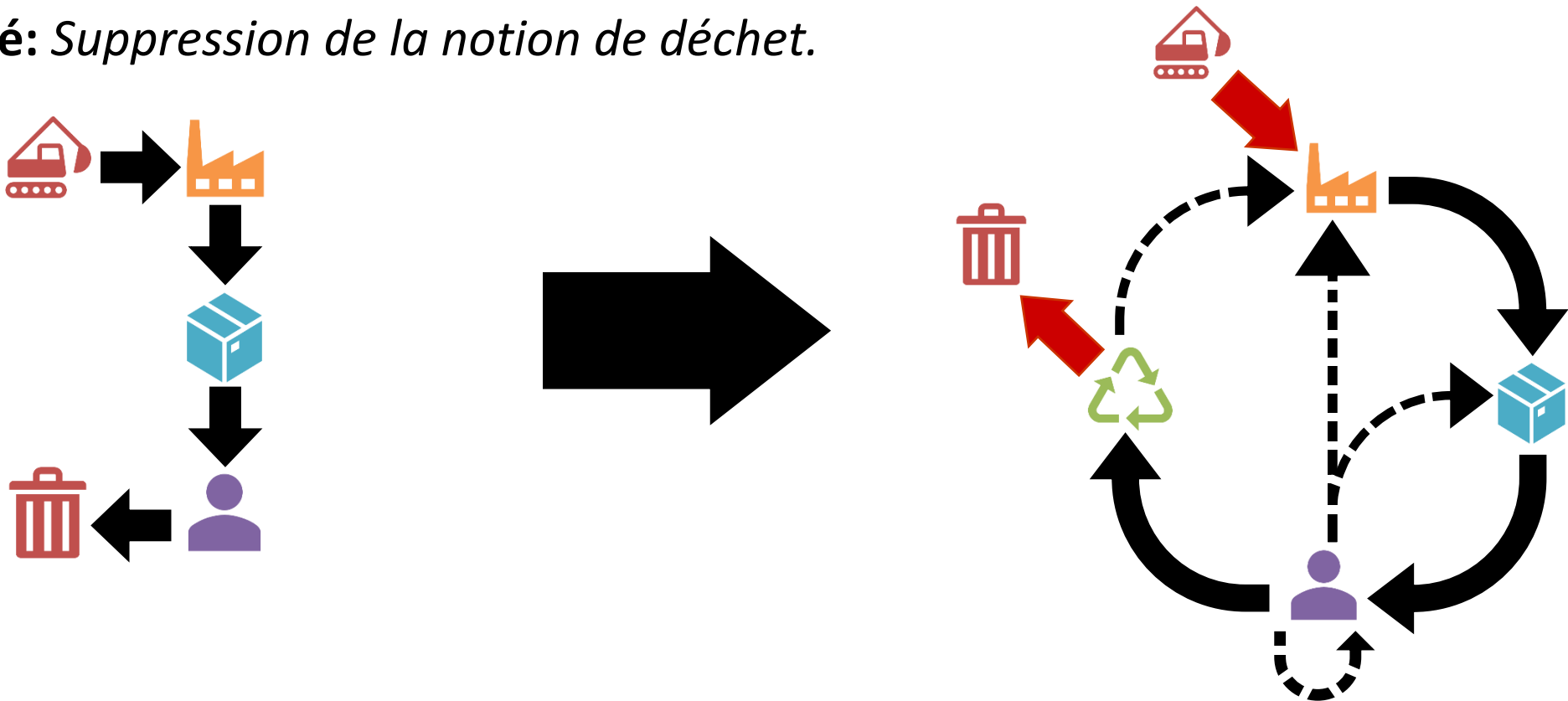
Rapport Brundtland 1987

Comment rendre l'électronique de puissance plus soutenable ?

Enjeux et soutenabilité

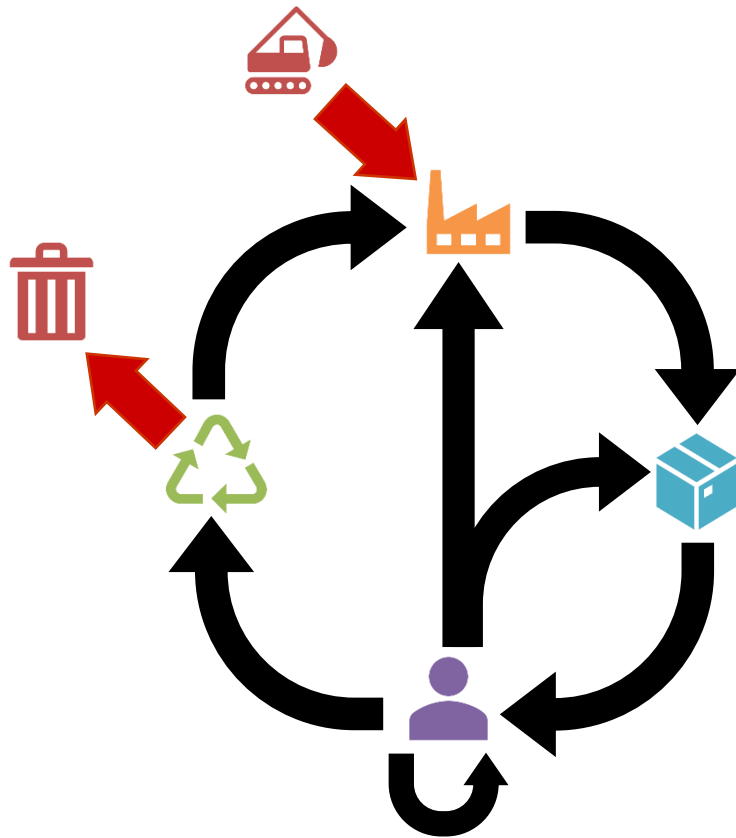
Faire de la place dans les cahiers des charges afin de concevoir pour la circularité.

Circularité: *Suppression de la notion de déchet.*



Enjeux et soutenabilité

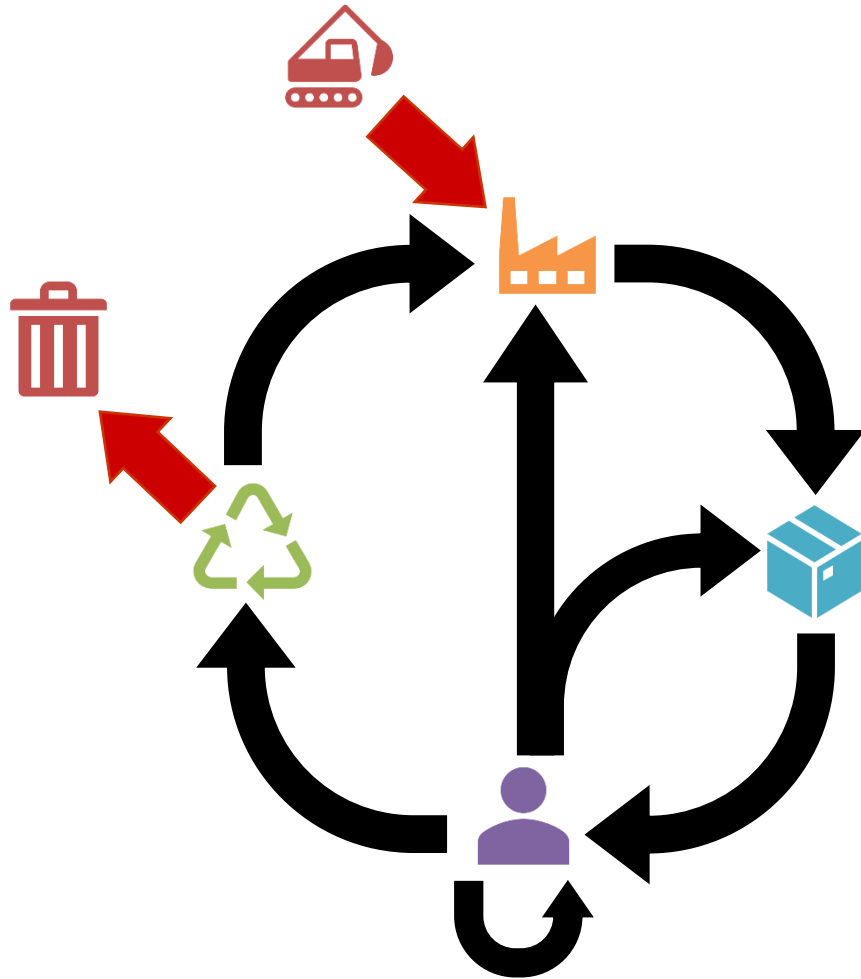
Question : quelles options de circularité connaissez vous ?



Energie nécessaire	
Recycler	Recyclabilité, tri des matières
Rénover	Remise à neuf, amélioration
Reconditionner	Standardisation
Réparer	Réparabilité, démontabilité, open-source
Réutiliser	Durée de vie, lutte contre l'obsolescence

=> Risque d'effet rebond

Enjeux et soutenabilité



Refuser

Sobriété, ne pas ajouter une fonctionnalité ou une matière

Repenser

Changer nos usages, mutualiser, modularité

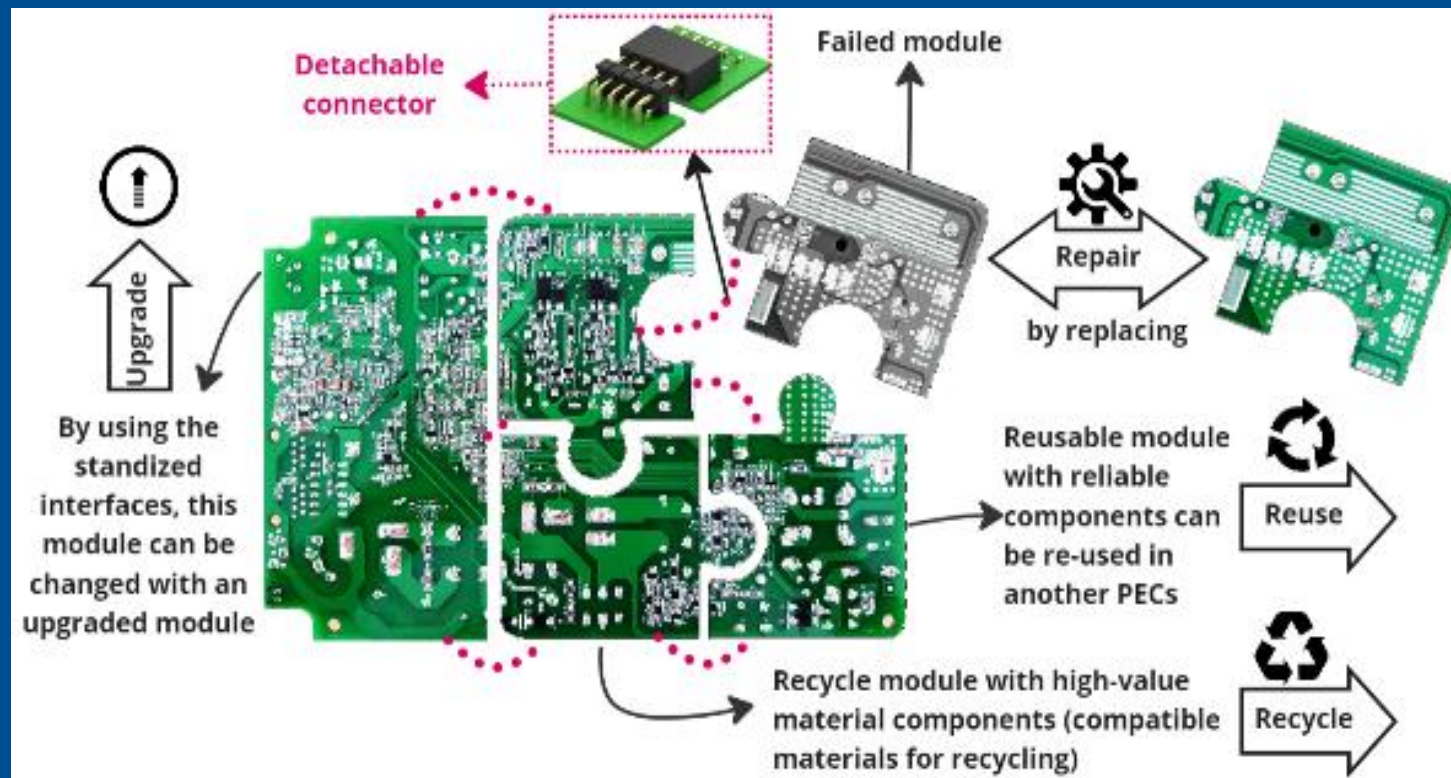
Réduire

Eco-conception, efficacité énergétique, moins consommer

=> **Risque d'effet rebond**

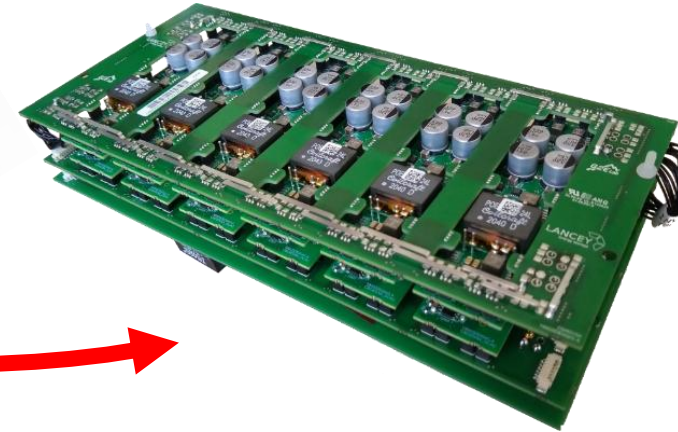
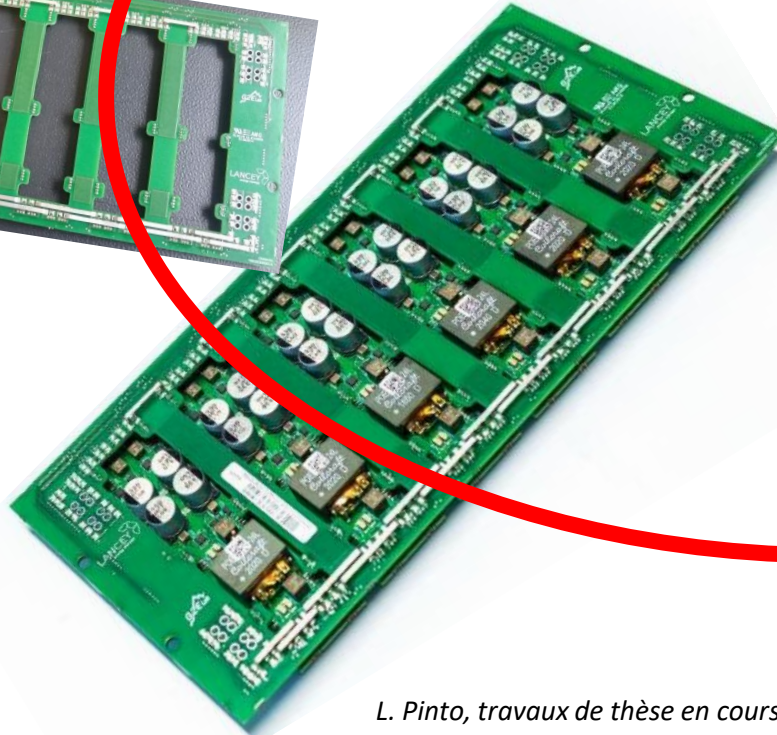
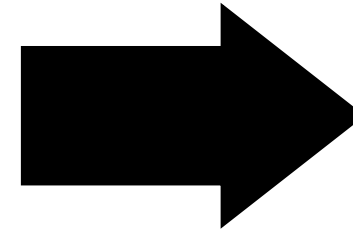
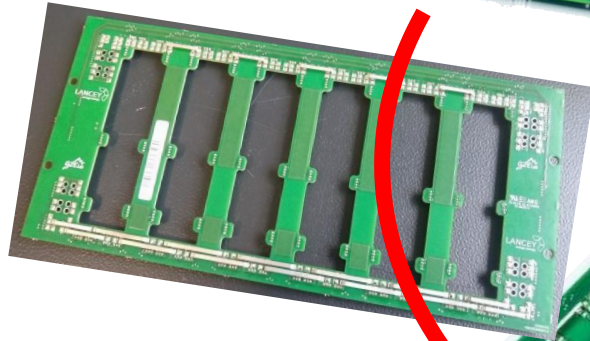
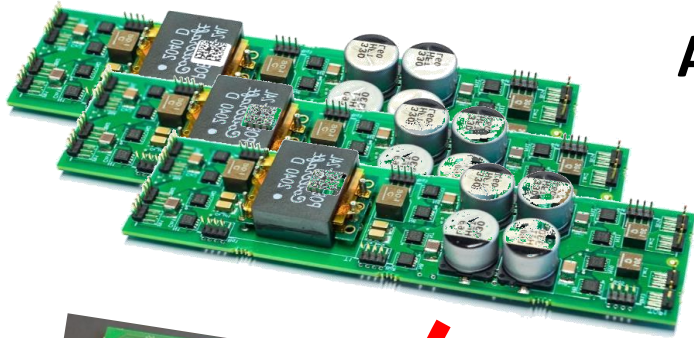
*Le mieux reste de ne pas entrer
dans la boucle ou d'y rester le plus
longtemps possible*

Cas d'étude sur la modularité en EP



Cas d'étude sur la modularité en EP

Alimentation modulaire pour serveur



L. Pinto, travaux de thèse en cours, Grenoble INP

Cas d'étude sur la modularité en EP

Avantages

Surdimensionnement plus faible
Réparation d'un module au lieu de l'alimentation complète
S'adapte au besoin en puissance => standardisation et lutte contre l'obsolescence

Inconvénients

Coût matière et énergétique à la fabrication plus élevé
Efficience énergétique moins élevée
Interconnexions complexes

Il s'agit donc d'un compromis entre la conception pour la performance technologique et le maintien de la valeur fonctionnelle dans le temps.

Conclusion

Conclusion

Et si nous avons déjà la technologie, les rendements et densités de puissance pour réussir la transition énergétique,

ce qu'il nous faudrait maintenant, c'est :

-faire de la place sur les gains de cout et de performances **pour gagner beaucoup en circularité...**

-reconnaitre les limites de la techno-solution

Pour **limiter les effets rebonds et les transferts d'impacts**

Quelle est votre opinion ?