

*L'électrification intelligente
au service de
la transition énergétique*



Premiers pas vers la soutenabilité en électronique de puissance.

Jean-Christophe CREBIER, chercheur CNRS
UMR CNRS 5269 CNRS - G-INP - UGA



Date : 06/10/2022

Contexte et agenda

- **L'humanité vit au dessus de ses moyens.**
- **Réduire nos impacts environnementaux est une nécessité.**

- La technologie nous sauvera-t-elle ?
- Allons-nous devoir faire preuve de sobriété ?

➔ Très certainement les deux...

- **Agenda**

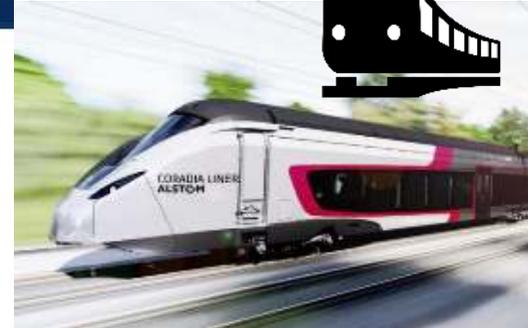
- Introduction
- Réflexions autour de l'écoconception et la circularité pour la soutenabilité en électronique de puissance.
- Actions en cours et points divers



Introduction (1)

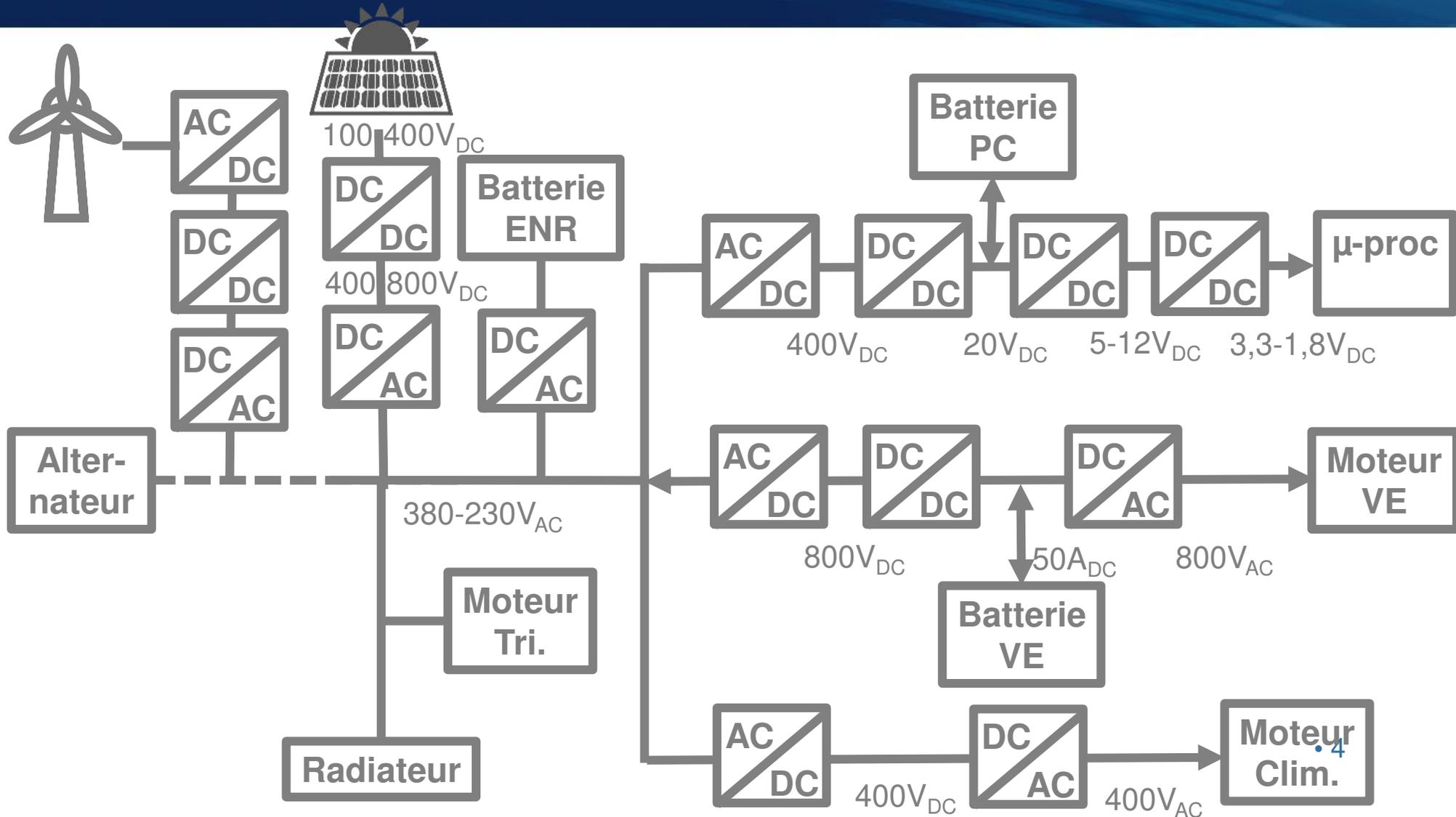
L'électronique de puissance

- Un peu partout dans nos sociétés modernes
- Un élément clé de la transition énergétique



Introduction (2)

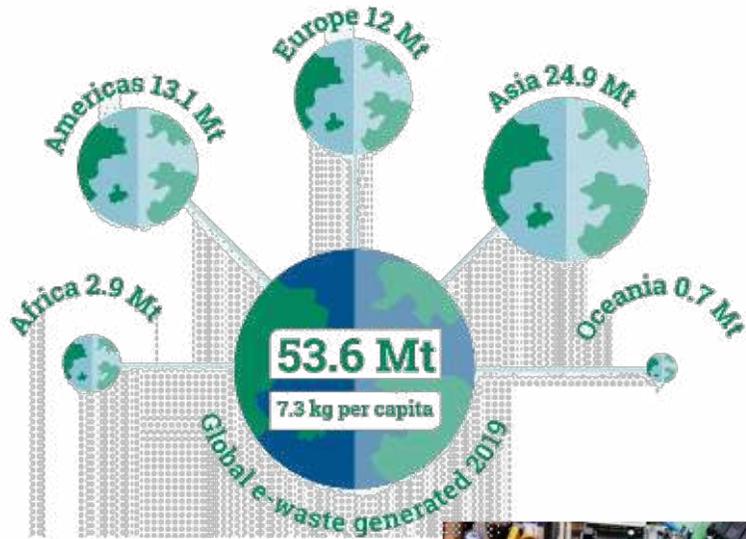
Un passage presque obligé



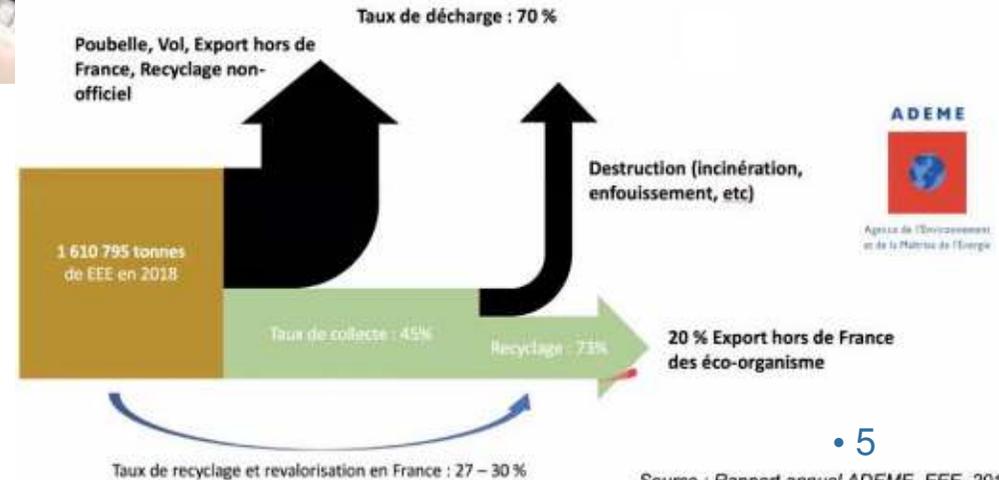
Introduction (3)

Une montagne de déchets ?

D-EEE - Electrique/Electronique/Electrotechnique



The United Nations Global E-Waste Monitor—2020



Introduction (4)

Ecoconception et circularité ne date pas de hier

■ Cela fait déjà longtemps que l'écoconception et la circularité sont bien en place dans certains secteurs :

- BTP (RT2020, nouveaux matériaux, rénovation, récupération,...)
- Le secteur de la mécanique (secteur du transport, ...)
- Les services (imprimantes/photocopieurs professionnels)
- L'électronique grand public (mobile, PC,...)

- **Proximité géographique** : Les travaux menés entre autres à Grenoble via le projet Circular porté par le laboratoire G-SCOP

- **Proximité thématique** : l'équipe de recherche du SATIE à Rennes travaille sur l'écoconception en Génie Electrique depuis plus de 15 ans.



SATIE

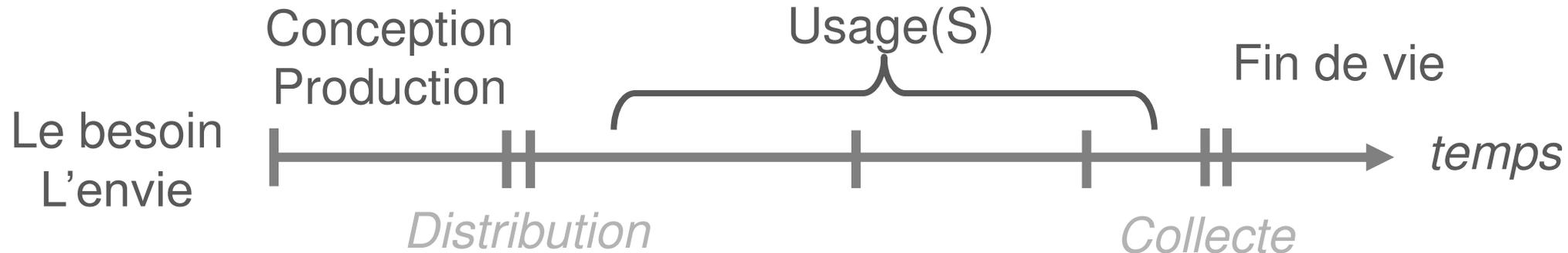
Introduction (5)

La soutenabilité en EP ?



- **Ecoconception : agir en amont et durant la phase de conception et production du produit pour :**
 - Réduire l’empreinte environnementale du produit au cours des différentes étapes de sa vie
 - Accroître et/ou faciliter la durée d’usage
- **Economie circulaire : Chercher des solutions, des moyens, de nouvelles pratiques pour :**
 - Prolonger la durée d’usage des produits
 - Conserver leur fonctionnalité totale ou partielle
- **Cela passe entre autres par l’ACV (Analyse du Cycle de Vie)**
 - Des métriques qui permettent de faire les bons choix !

La soutenabilité, c'est une affaire de chaque «instant»



■ Conception/production

- Re-conception produits éco-Responsables (empreinte **R**éduite, **R**espectueux de l'environnement), fiables (**R**eliable), durables (**R**obust) et **R**ésilients

■ Usages et durées d'usages

- Des produits **R**éparables (maintenables), **R**éutilisables, **R**econditionnables

■ Gestion de la fin de vie

- Des produits/objets **R**ecyclables

■ Au delà du produit lui-même, il y a l'opportunité de .8

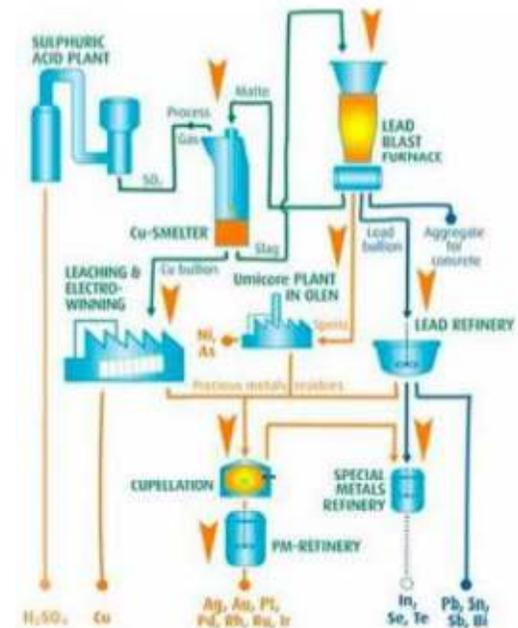
- Réduire nos besoins, de **R**efuser d'y avoir recours



Le Recyclage...

■ Dans le recyclage, il y a à boire et à manger !

- Au sens noble du terme, **Recycler** c'est récupérer la matière première et la réintroduire dans la chaîne d'approvisionnement !
- Mais c'est aussi très/trop souvent du Downcycling (perte de caractéristiques), voire de la valorisation énergétique (incinération).
- **Recycler**, c'est encore consommer de l'énergie, des intrants, concentrer certaines pollutions, et c'est aussi perdre une partie de la valeur initiale et l'intégralité de la fonctionnalité.



Processus de recyclage à Umicore

■ Il nous faut donc nous sortir de la tête que le recyclage est la solution à tous nos problèmes de consommation

L'EP plus recyclable... Illustrations



Recycler l'EP c'est complexe car :

- Nombreux composants/matériaux sont nécessaires => **forte hétérogénéité**
- Nombreuses technologies d'assemblage/interconnexion => **désassemblage difficile** en vu du tri
- **Miniaturisation et intégration croissante** => tri et extraction des matières premières complexes

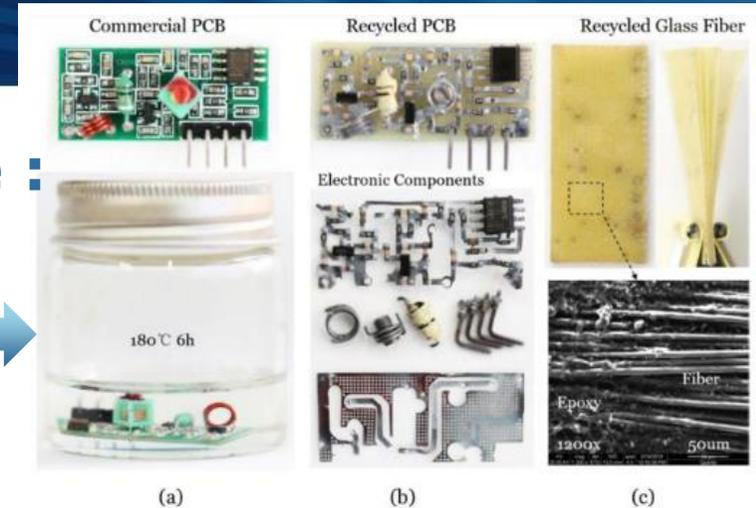


Source : T. Turkbay
PhD candidate
G2ELab-I2M

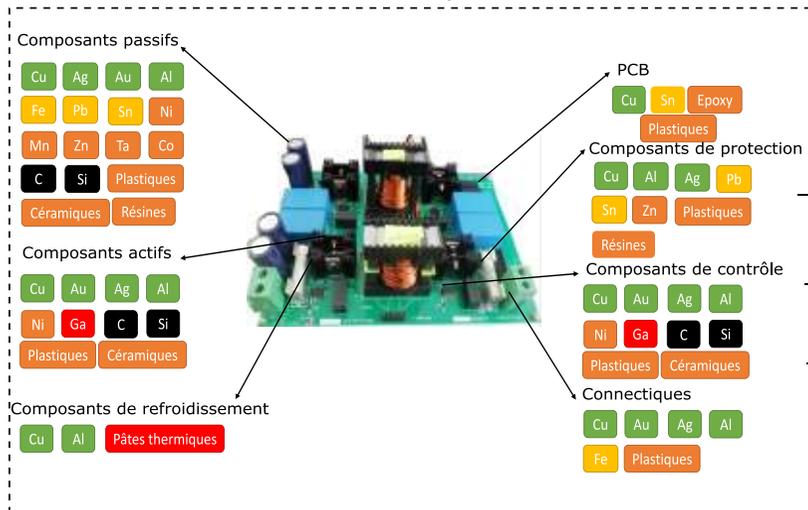
L'EP plus recyclable...

Quelques pistes pour s'en remettre :

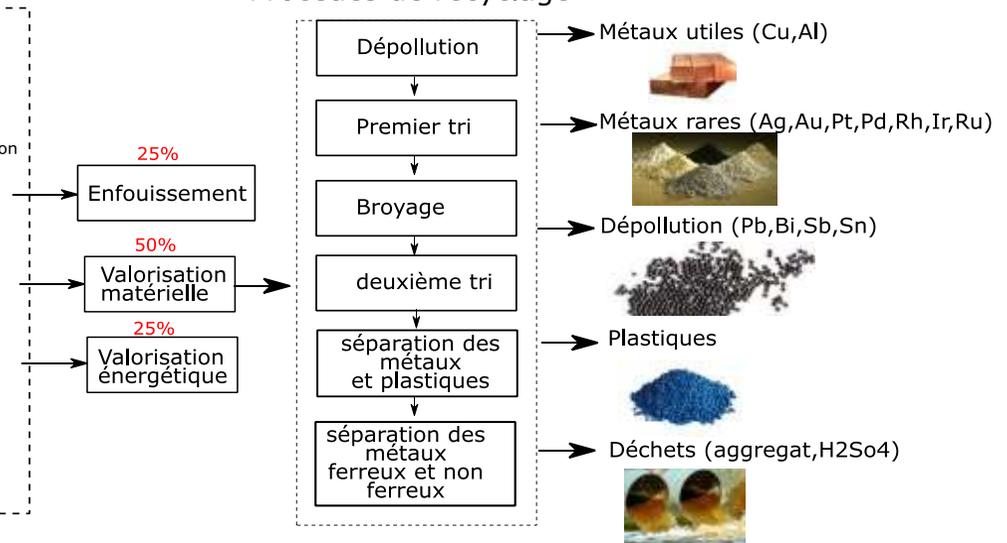
- (Re-) Concevoir en vu du Recyclage
- Développements techno. « éco-friendly »
- Mieux appréhender BOM et techno



Convertisseur de puissance



Procédés de recyclage



Source : B.Rahmani
PhD candidate G2ELab-G-SCOP

Réutiliser, Réparer et/ou Re-conditionner

■ Réutiliser, Réparer et Reconditionner c'est :

- Prolonger la durée d'usage des produits, **conserver la valeur fonctionnelle** à son plus haut niveau
- Ce sont parmi les plus grands gisements de **+Réduction** des impacts environnementaux et de **+Relocalisation** de l'emploi et de la valeur ajoutée



■ Pour Réutiliser, Réparer et Reconditionner il faut :

- Un **écosystème structuré** et compétent pour répondre aux besoins
- Un **cadre réglementaire**, l'accès aux données qui permettent de réparer et/ou reconditionner les produits
- Un **cadre légal** qui permet au producteur initial d'être déchargé des usages suivant



L'argus

L'EP plus Réutilisable, Réparable Re-conditionnable

■ Les limites actuelles en électronique de puissance :

- Techniques très complexes, dangers
- Peu ou pas de support au diagnostic
- Absence quasi-totale de modularité et/ou de « standardisation »
- La viabilité économique



■ Ce qu'il est possible de faire au niveau technique :

- (Re-) Concevoir en vue du désassemblage pour Faciliter l'extraction :
 - et le remplacement des éléments défectueux ou en fin de vie
 - de la valeur résiduelle, en partie ou totalement
- Développer la modularité et la standardisation « inter-applications »
- Rationaliser la chaîne d'approvisionnement (réduire les variantes, les types de composants,...) et les technologies

L'EP plus Réutilisable, Réparable

■ Etude des contraintes de désassemblage de produits

● 1^{ère} année thèse T. Turkbay

Source : T. Turkbay

PhD candidate G2ELab-I2M



■ Conception modulaire pour versatilité et maintenance

● 2^{ème} année thèse H.Pichon



Source : Rapport projet
Lancey Energy Storage 2021

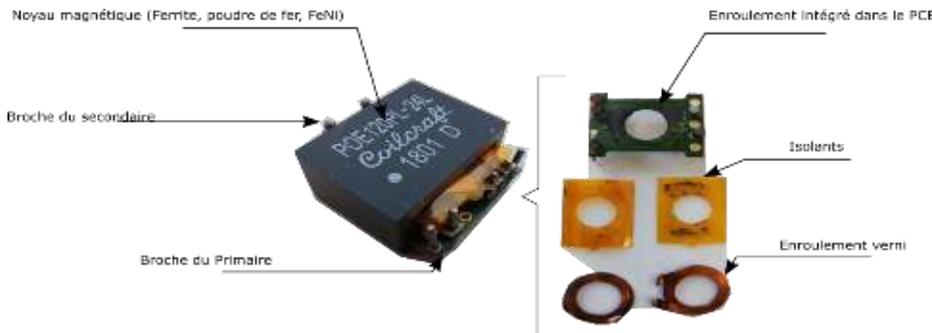
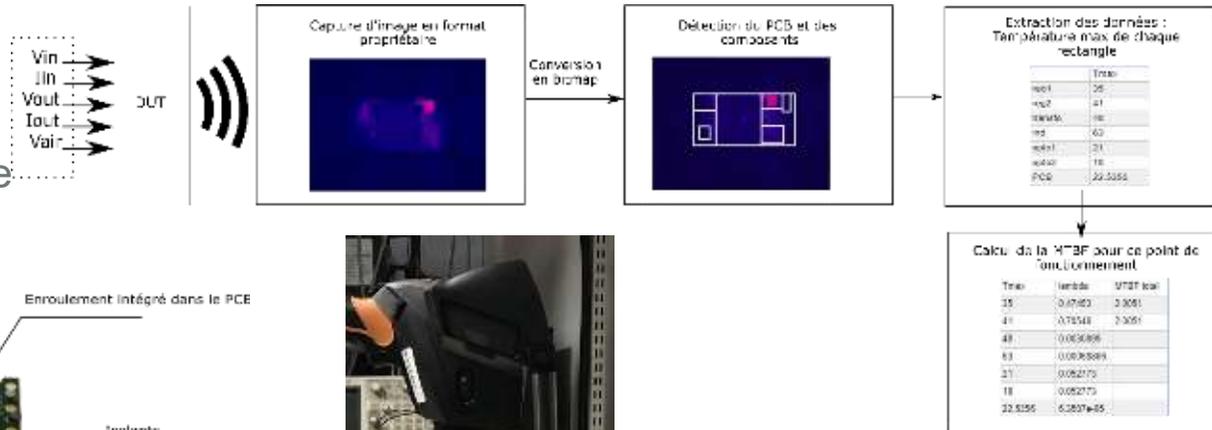


L'EP plus Réutilisable, Réparable, Illustrations

Les indicateurs de valeur résiduelle ou encore de valeur fonctionnelle (monitoring du vieillissement - SOH)

- Suivre le vieillissement du convertisseurs et/ou des composants critiques (reproduction de profil de mission réel)
- En déduire la durée de vie résiduelle ou encore la valeur fonctionnelle résiduelle en vue de

- La maintenance
- La réparation
- L'extraction valeur résiduelle



Sources : B.Rahmani
PhD candidate G2ELab-G-SCOP

La fiab.(Reliability), la Robustesse et la Résilience en EP

■ **Au service de la durée de vie des systèmes. Vous en avez déjà pas mal appris sur le sujet aujourd'hui...**

■ **Avec le regard de l'éco-concepteur :**

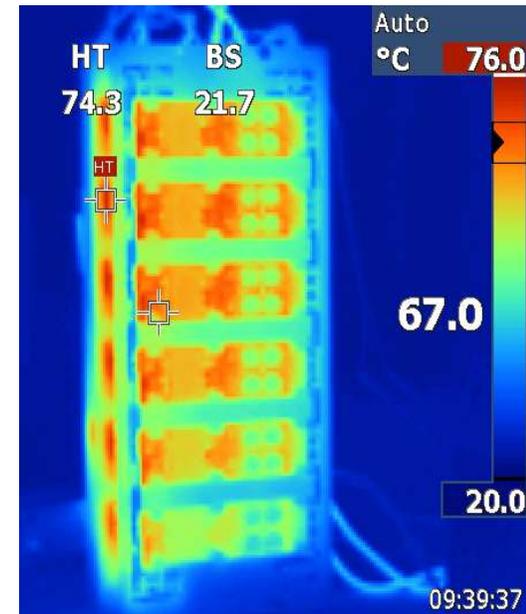
● Augmenter la durée d'usage des systèmes de conversion

● **Homogénéiser les durées de vie :**

- En interne au système de conversion
- En externe, en lien avec les dispositifs en amont et/ou en aval du convertisseur

● **Distribuer et homogénéiser** les contraintes électriques, thermiques et mécaniques

● Développer des techniques de **conversion modulaires plus Robustes et plus Résilientes** (grâce à la tolérance aux pannes, au fonctionnement en marche dégradée)

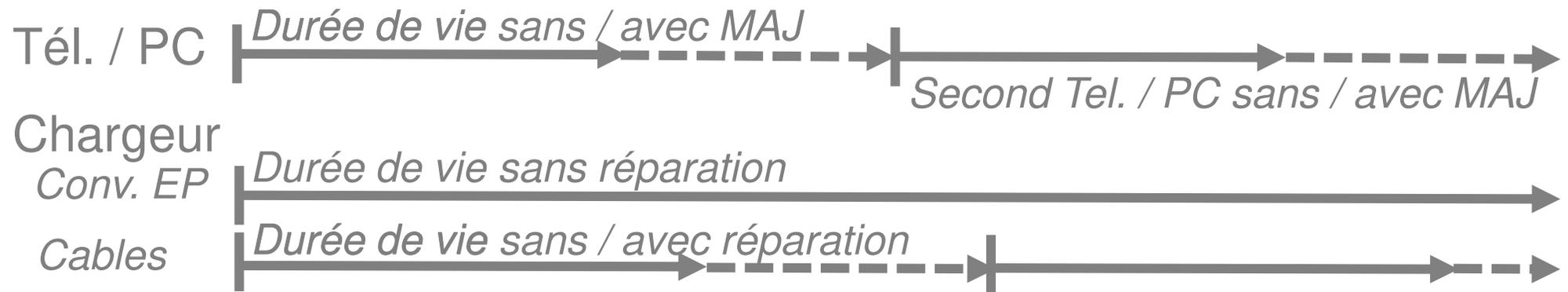


Modularité, standardisation, et fiab

Illustration chargeur Tel./PC



Alimentation externalisée : gain de poids et d'épaisseur



La (Re-) conception éco-Responsable

■ Ajouter dans le cahier des charges des contraintes environnementales

- Avec des objectifs de réduction de l'empreinte environnementale
- Sans oublier les impacts autres que ceux du CO2 ou du coût énergétique

■ Intégrer des recommandations, des critères, indicateurs etc...

- L'analyse du cycle de vie (ACV)
- L'analyse des modes de défaillance, de leurs effets et criticité (AMDEC)



■ Concevoir en vue de la circularité

- En vue de la réparation, du réemploi, du reconditionnement, de l'extraction de la valeur résiduelle et du recyclage.

La (Re-) conception éco-Responsable en EP

■ L'électronique de puissance aujourd'hui c'est toujours la recherche de la performance.... Et c'est bien !

- Les ACV montrent que les pertes à l'usage représentent une partie importante de la facture énergétique
- Augmenter les densités de puissance, c'est réduire les quantités de matières mise en œuvre.
- Sacrifier le rendement et les hautes densités de puissance serait contre productif.



■ Mais doit-on s'en satisfaire ?

- Quid des autres empreintes environnementales : biodiversité, pollutions, ressources minières et énergétiques, eau... ?
- Mieux appréhender le nécessaire à « survie » du convertisseur et/ou des sous-ensembles le constituant, pour préserver la valeur fonctionnelle

Source : Site internet
STMicroelectronics

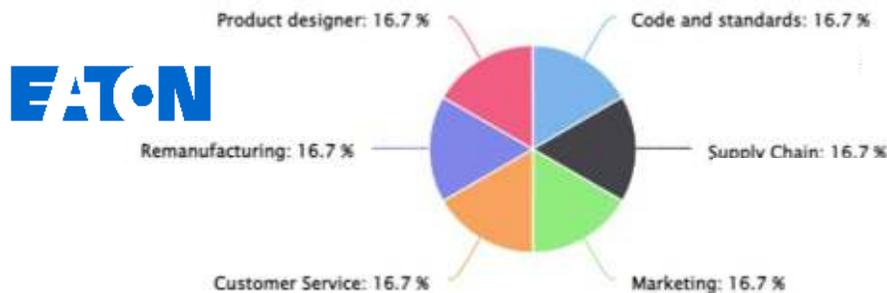
La Re-Eco-conception en EP Illustration

■ **C'est aussi une affaire d'expert, de méthodes de travail. Eco-concevoir c'est partir des habitudes du concepteur, appréhender toutes les facettes de son métier**

- Analyse 360 qui tient compte de toutes les facettes qui mène au produit.
- Des entretiens avec tous les cœurs de compétences autour du produit



Source : L. Fang
PhD candidate G-SCOP G2ELab



Source : L. Fang
PhD candidate G-SCOP G2ELab

■ **Proposer des solutions pour intégrer les outils et méthodes en éco-conception**

Le cas de l'Analyse du Cycle de Vie en EP

■ Quelle est la problématique ?

- EP = **forte diversité/hétérogénéité** des matériaux, composants et procédés....
- **Incertitudes** face aux origines des matériaux, composants, sous-ensembles
- **Incertitudes** face aux « coûts » environnementaux des procédés mis en œuvre à chaque étape de la fabrication.
- Quand on regarde un produit fini, **on est face à une montagne pour mener à bien l'inventaire des convertisseurs statiques !!!**

Le cas de l'Analyse du Cycle de Vie en EP

■ La solution idéale ?

- Le plus simple et le plus efficace serait que **chaque producteur conduise l'ACV de ses produits** en s'appuyant sur des ACV réalisées par ses fournisseurs, que ceux-ci soient des produits ou des services.
- **Le cadre réglementaire doit être mis en place ...**

■ Les contributions des chercheurs ?

- **Passer de l'ACV à posteriori à l'ACV a priori.** Imbriquer l'ACV dans le processus de conception, au plus tôt et de manière interactive.
- Développer des **modèles ACV compacts** (simplifiés) pour les intégrer les contraintes associées des les premières phases de conception.
- Développer des support de **formation aux spécificités de l'ACV en EP** à destination des jeunes chercheurs et des personnels dans l'industrie

Et au delà du convertisseur, ce qu'il est possible de faire

■ Réduire les volumes de dispositifs à usages constants !

- Standardiser les dispositifs (cf chargeur de téléphone)
- Mutualiser les moyens (auto/VE/trot. partage)

■ Refuser !

- Conserver et utiliser les dispositifs, pour peu qu'ils continuent de remplir leur fonction...
- Maitriser notre suréquipement (exemple de la mobilité électrique)

Source : Site internet Vegaboard



Les aspects réglementaires en lien avec la soutenabilité en EP



■ Les historiques dans le domaine du GE :

- RoHS (Restriction of hazardous substances in EEE). La directive no 2011/65/UE **limite** les polluants, **adopte le principe de responsabilité** du producteur et **encourage** l'écoconception, le tri sélectif et le recyclage...
- REACH règlement européen (n° 1907/2006) pour **maitriser l'emploi des substances chimiques** CMR (cancérigène, mutagène, repro-toxique)



Source : J. Melot -EATON
Présentation GT-CEPPS –Juin 2022

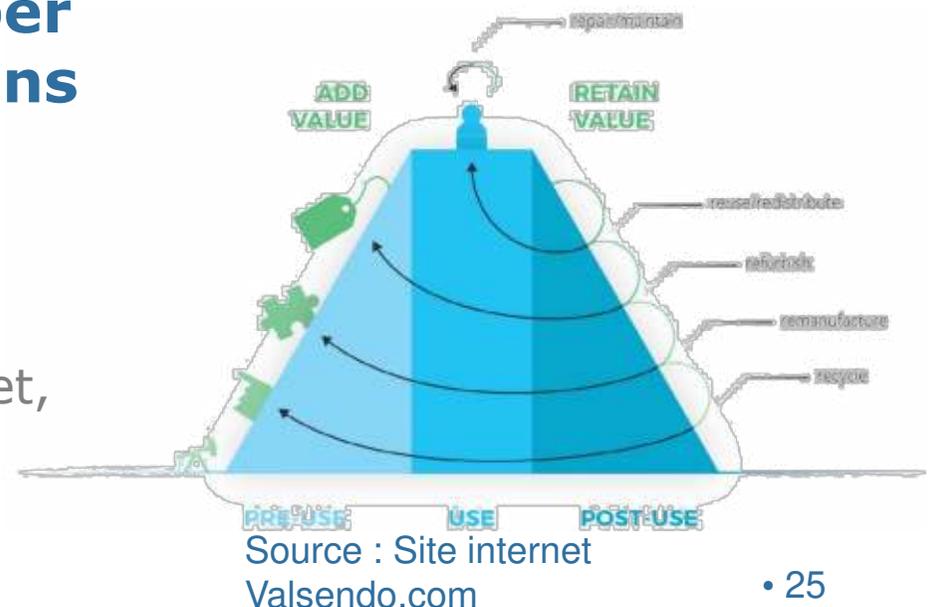
■ Celles au niveau DD-RS :

- EN 45553-8 : Méthodes d'évaluation en circularité
- ISO14040 – 14044 : Pratique des ACV (méthodes, étapes,...)
- ISO 14000/1/4/5 et 26000 : Bonnes pratiques en management de l'environnement et de responsabilité sociétale. Démarche volontaire



L'importance de la formation en écoconception et circularité

- Nos filières en formation initiale intègrent de plus en plus les aspects environnementaux
- Il reste encore beaucoup à faire pour développer des contenus adaptés aux différents secteurs
- Surtout, il va falloir développer des contenus et des formations accessibles et adaptés aux professionnels (formation continue, requalification,...)
 - Il y a déjà beaucoup de sites internet, blog, MOOC...



Et R&D en écoconception en EP alors ?



- **Sur les 10 dernières années, la production scientifique est faible (~20 articles de conférences/journaux, hors sujet sur la fiabilité)**
- **Depuis quelques années ça bouge :**
 - Des GT (Groupes de Travail)
 - GT LCA de la PFA (filiale automobile) autour de l'onduleur et du chargeur pour VE.
 - GT CEPPS du GdR SEEDS (Convertisseurs Electronique de puissance Plus Soutenables)
 - Des projets se montent avec succès (soutien des institutions).
 - VIVAE, EECONE (avec beaucoup d'industriels impliqués et motivés)
 - Des recrutements récents dans le milieu académique et au CEA
 - Ampere Lab et ENIT à Tarbes
 - Des offres d'emploi écoconception dans de nombreux GG du domaine
 - ST Microelectronics, Schneider Electric,...

L'électronique de puissance et les low-tech ?

■ Définition des low-tech :

Source : Dossier du CDP
« Science et Résilience » (Juin 2022)

- Dispositif conçu et produit à partir de matériaux et procédés locaux et renouvelables, réparables par tout un chacun et résilient aux changements climatiques



Source : forum Low Tech TRE

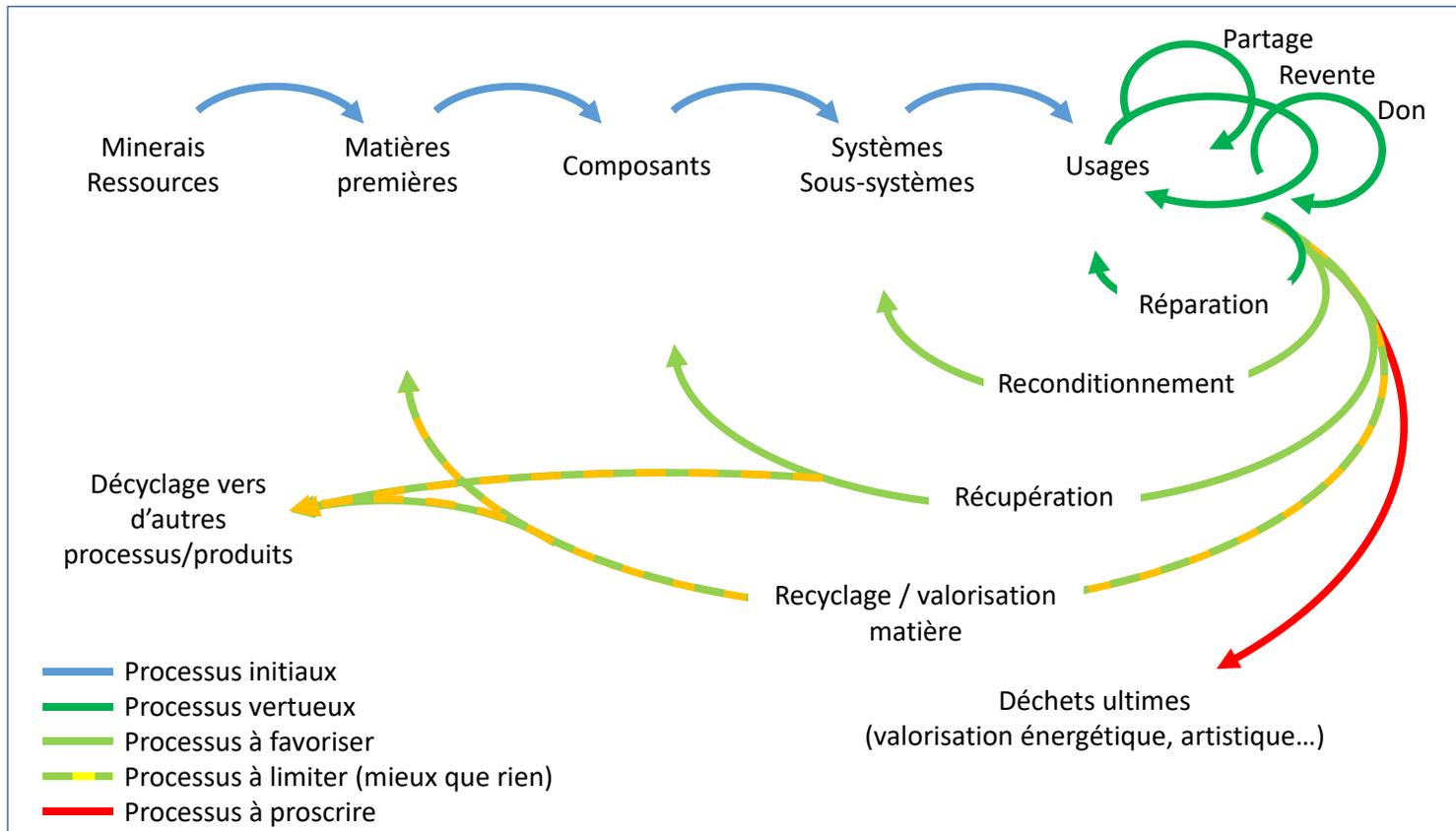
■ Son développement au sein de l'EP ?

- Pas facile, l'EP c'est très techno, très complexe... Pour ainsi dire, ce domaine ne coche aucune des cases de la définition ci-dessus.
- Avec elle, la plupart des technologies modernes en lien avec la décarbonation de nos sociétés (les ENR, la mobilité électrique, la climatisation,...)
- C'est une question ouverte, réponse dans quelque temps....

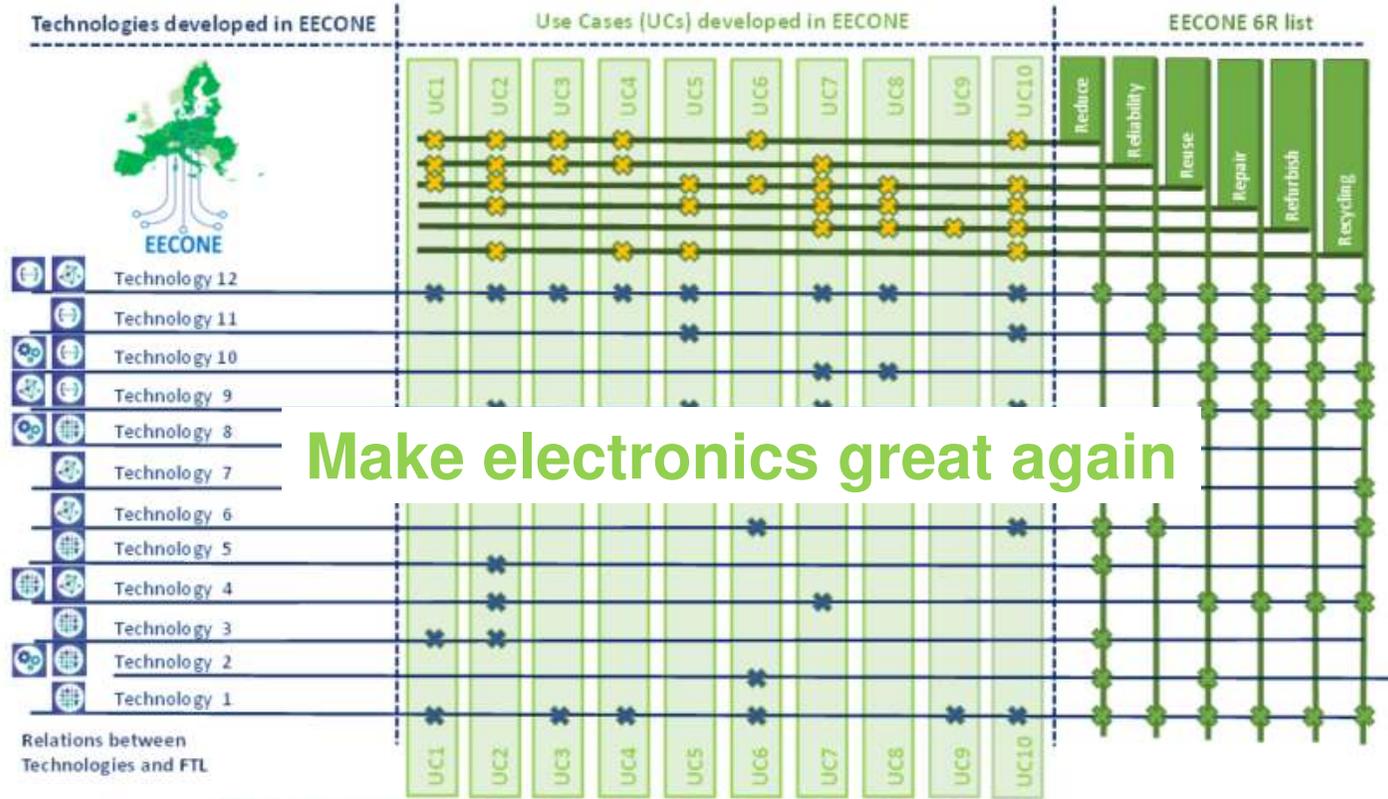
VIVAE : des cycles de Vie innovants pour conserver la VAleur de l'Electronique de puissance



Source : Site internet vivae.energie-société.fr



Projet Européen EECONE



Make electronics great again

Source : EECONE Project Proposal

Relations between Technologies and FTL

Relations between UCs and KAA

Relations between UCs and 6R

Relations between EECONE Technologies and UCs

Relations between Technologies and 6R

Fundamental Technology Layers (FTL)

- System of System
- Embedded Software and Beyond
- Components, Modules and Systems Integration
- Process Technology, Equipment, Materials and Manufacturing

Key Application Areas (KAA)

- Mobility
- Energy
- Digital Industry
- Health and Wellbeing
- Agrifood and Natural Resources
- Digital Society

Le mot de la fin



- **Le progrès technologique dispose d'un gros potentiel ! A nous d'en faire bon usage....**
- **Poser un nouveau regard sur l'électronique de puissance était devenu pour moi nécessaire**
- **En ayant retrouvé la conviction que mon activité professionnelle contribue aux solutions de demain mais surtout pour demain**
- **J'espère vous avoir donné l'envie de vous investir dans de nouveaux enjeux pour une électronique de puissance soutenable.**