



HAL
open science

Contribution à la définition des enjeux et verrous de la soutenabilité en électronique de puissance

Adrien Voldoire, Guillaume Vine, Luiz Fernando Lavado Villa, Paul-Etienne Vidal,
Ulrich Soupremanien, Florentin Salomez, Boubakr Rahmani, Tanguy Phulpin,
Pierre Lefranc, Lionel Laudebat, et al.

► **To cite this version:**

Adrien Voldoire, Guillaume Vine, Luiz Fernando Lavado Villa, Paul-Etienne Vidal, Ulrich Soupremanien, et al..
Contribution à la définition des enjeux et verrous de la soutenabilité en électronique de puissance. Symposium
de Génie Electrique (SGE 2025), Jul 2025, Toulouse, France. ⟨hal-05284240⟩

HAL Id: hal-05284240

<https://hal.science/hal-05284240v1>

Submitted on 26 Sep 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization

Contribution à la définition des enjeux et verrous de la soutenabilité en électronique de puissance

Adrien Voldoire¹, Guillaume Vine², Luiz Villa³, Paul-Etienne Vidal², Ulrich Soupremanien⁴, Florentin Salomez⁵, Boubakr Rahmani⁶, Tanguy Phulpin¹, Pierre Lefranc⁵, Lionel Laudebat⁷, Marina Labalette¹³, Pierre-Olivier Jeannin⁵, Hugo Helbling⁸, Suzanne Guillou^{5,6}, Vincent Grennerat^{5,9}, Murielle Fayolle-Lecocq⁶, Laurent Dupont¹⁰, Jean-Christophe Crébier⁵, Antoine Cizeron⁸, Elise Chaumat⁶, Daniel Chatroux⁴, Hamid Ben-Ahmed¹¹, Morgan Almanza¹²

¹ Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, Laboratoire de Génie Électrique et Électronique de Paris, 91192, Gif-sur-Yvette, France

² Univ. Toulouse, INP-ENIT, LGP, 65000 Tarbes, France

³ LAAS-CNRS, 7 avenue du Colonel Roche, 31031, Toulouse, France

⁴ Université Grenoble-Alpes, CEA-Liten, 17 Avenue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex 9, France

⁵ Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2ELAB, 38000 Grenoble, France

⁶ Univ. Grenoble Alpes, CEA, Leti, F-38000 Grenoble, FRANCE

⁷ Laplace, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France

⁸ Univ Lyon, INSA Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, Ampère UMR 5005, F-69621 Villeurbanne, France

⁹ IMEP LAHC, Univ. Grenoble Alpes, Université Savoie Mont-Blanc, CNRS, Grenoble INP, 38000 Grenoble, France

¹⁰ Univ. G. Eiffel, Laboratoire SATIE - ENS Paris-Saclay, CNRS, 4 avenue des Sciences, 91192, Gif-sur-Yvette

¹¹ ENS Rennes, SATIE, CNRS, BRUZ France

¹² Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, Laboratoire SATIE

¹³ Institut de Recherche Technologique Saint Exupéry, 3 Rue Tarfaya, 31400 Toulouse, France

RESUME – Le GT-CEPPS (Groupe de travail - Convertisseurs Electroniques de Puissance Plus Soutenables) du GDR SEEDS (Systèmes d’Energie Electrique dans leur Dimensions Sociétales) présente ici le fruit de son travail de réflexion autour des enjeux et verrous de la soutenabilité en électronique de puissance. Le travail porte sur deux facettes de la thématique, les outils, méthodes, indicateurs d’une part, et la conception en vue de la circularité d’autre part. L’analyse est structurée en quatre niveaux qui correspondent à des échelons de difficulté, de transformation et d’acceptabilité sociétale. Dans chaque niveau, des enjeux et des verrous sont décrits et ensuite traduits en pistes d’activités de recherche. L’ensemble est contextualisé et illustré via les activités en cours aux échelles nationale et européenne.

Mots-clés— *Ecoconception, circularité, électronique de puissance, enjeux et verrous, feuille de route R&D*

1. INTRODUCTION

La décarbonation de nos sociétés est mise en œuvre à travers l’électrification massive de nos usages et le recours aux énergies renouvelables. Cette transition énergétique pourrait être le lit de multiples transferts d’impacts environnementaux si des efforts ne sont pas investis pour appréhender les conséquences du déploiement massif des usages électriques. Parmi les technologies nécessaires à l’électrification, l’électronique de puissance (EP) présente un ensemble de caractéristiques qui en font un enjeu important pour la soutenabilité de nos sociétés. Les produits d’EP, contenant de nombreux matériaux et composants, et répondant à des besoins et durées de vies variables, font partie des dispositifs techniques complexes (et donc coûteux) à recycler. L’évolution des performances des dispositifs de conversion repose de plus en plus sur des matériaux critiques, dont le tri et la récupération sont rendus difficiles du fait de leur forte intégration mécanique. Les cartes électroniques, par exemple, échappent pour partie au recyclage et finissent en décharge ou sont incinérées, car elles présentent un faible capital exploitable. Celles qui sont recyclées, ne le sont que partiellement et pour quelques matériaux critiques ou onéreux par un processus économiquement viable. Enfin, la qualité des

matériaux recyclés est en question, tout comme le recyclage à proprement dit, qui ne permet que trop rarement de restituer les propriétés initiales des matériaux constituant les convertisseurs statiques.

Face entre autres à l’explosion du volume des Déchets Équipements Électronique et Électriques (DEEE) [1], il est urgent de prendre en considération les impacts environnementaux au plus tôt dans les phases de conception des dispositifs de l’EP pour apporter des solutions techniques viables et plus soutenables [2, 3, 5]. Les membres du GT-CEPPS (Groupe de Travail - Convertisseurs Elec-troniques de Puissance Plus Soutenables), ambitionnent de relever ce défi et réfléchissent aux enjeux, verrous et activités de R&D à conduire. Cet article présente le fruit des réflexions menées ou en cours.

L’article est structuré en niveaux, permettant d’organiser les enjeux, verrous et thèmes de recherche en fonction de critères tels que : la temporalité, l’efficacité (ou encore le caractère transformant), la difficulté ou encore l’acceptabilité par la filière. Les 4 niveaux proposés sont présentés Figure 1.

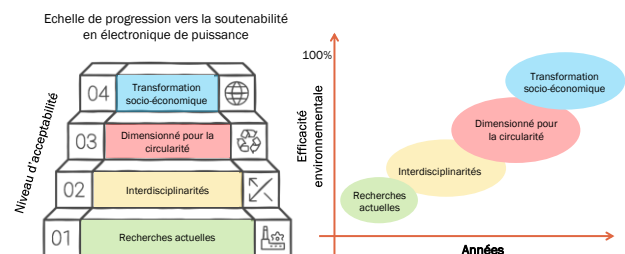


Fig. 1. -Illustration des 4 niveaux de transformation envisagés pour une électronique de puissance plus soutenable.

Ils décrivent les différentes étapes à engager pour passer de l’état actuel avec la conception de convertisseurs d’EP, très peu soutenables (Niveau 1 : recherches actuelles), pour gagner progressivement en soutenabilité. Le niveau 2 propose de travailler en interdisciplinarité, de collaborer entre experts de différentes formations et/ou disciplines (des experts techniques

de l'EP tels que électromécaniciens, physiciens, énergéticiens, des spécialistes de méthodes, ainsi que des experts en environnement comme des « ACVistes »). Cette interdisciplinarité permettra d'avoir une vision globale et précise de l'ensemble du cycle de vie des produits d'EP, dans les différents domaines d'applications. Pour gagner une « marche » de plus en soutenabilité, le niveau 3 propose d'avoir une pensée circulaire, et de dimensionner pour la circularité. Il s'agit de passer du mode fabrication-usage-déchet actuel qui est linéaire (en fin d'usage les objets sont considérés comme des déchets et sont jetés) vers une approche circulaire où, en fin d'usage, la valeur résiduelle des objets est prise en compte. La fin d'usage ne signifie plus fin de vie car l'objet ou des parties de l'objet ont alors été conçues pour la réutilisation, le réemploi ou le recyclage des composants et matières le constituant. Enfin, le niveau 4, celui qui permettra de gagner le plus en soutenabilité, prendra en compte une vision encore plus globale (systémique, holistique) de l'EP, en s'appuyant sur une transformation socio-économique. Le passage par chacun de ces niveaux nous semble nécessaire pour aller de façon progressive mais efficace dans l'acceptabilité de ces transformations, car le « gap » de transformation est important. Pour chacun de ces niveaux nous présentons dans la suite de ce document des exemples de travaux, ainsi que les principaux enjeux et verrous que nous avons identifiés. Ceux-ci sont détaillés, et des pistes de travail sont proposées pour surmonter ces verrous.

2. NIVEAU 1 : RECHERCHES ACTUELLES

L'électronique de puissance est développée de longue date avec pour principaux objectifs de minimiser les pertes et les coûts, et d'augmenter les fonctions, les densités de puissance et la fiabilité. Ces caractéristiques présentent toutes, prises individuellement, des bénéfices potentiels par rapport aux Impacts Environnementaux (IE) induits par la technologie. Toutefois, comme cela se voit dans ce domaine, mais aussi dans la plupart des technologies, des effets rebonds dus aux gains de performances conduisent in fine à un accroissement continu des IE. Qui plus est, la technologie étant aujourd'hui très mature, les niveaux de performance sont très élevés avec par exemple des marges de gains faibles et couteuses en R&D sur le rendement.

Les enjeux actuels à ce niveau sont tournés vers la prise en compte de l'impact carbone de l'EP, avec les conséquences aujourd'hui connues sur le changement climatique, ou encore sur l'évaluation des impacts induits sur une partie du cycle de vie (le plus souvent la phase d'utilisation) ou encore l'analyse sur cycle de vie d'un élément particulier. Ces approches, toutes décrites ici comme partielles, ne prennent pas en compte les divers impacts environnementaux, l'intégralité du cycle de vie des produits et l'ensemble des éléments constituant le produit.

Par exemple, Musil et al. [3], présentent une étude comparative entre un module de puissance fabriqué avec des composants Si-IGBT et un autre contenant des SiC-MOSFET (étude vue sous l'angle IE CO₂). Les auteurs précisent que pour limiter les effets dévastateurs du changement climatique, il serait nécessaire de sortir rapidement de l'économie linéaire pour arriver à mettre en place une économie dite circulaire. Les résultats d'une analyse de cycle de vie sont présentés pour un onduleur de puissance dédié aux technologies solaires (cet onduleur est développé par la société Fronius). Un diagramme permettant de voir l'impact de chacun des sous-éléments du convertisseur est présenté sur la Fig. 2.

Les auteurs précisent qu'il serait nécessaire de conduire une ACV plus complète se basant sur une optimisation multi-objectifs, prenant en compte les autres impacts environnementaux que le CO₂. Cette étude reste intéressante car, il s'agit de résultats où des intervenants industriels prennent part à ces analyses en détaillant les données propres à leurs développements produits.

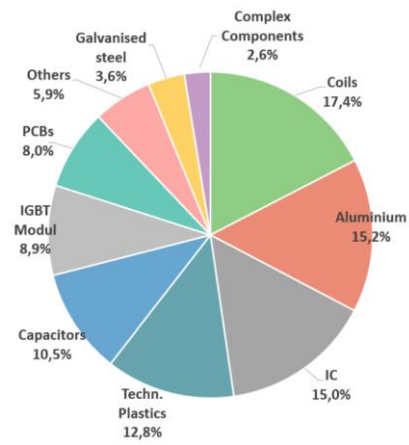


Fig. 2. Contribution réelle des composants de l'onduleur de puissance en fonction de l'impact environnemental CO₂ en %/kg [3]

Plusieurs obstacles sont face à nous. Les données d'inventaires fiables sont manquantes pour de nombreux composants et systèmes d'électronique de puissance. De plus, la grande diversité des applications, des filières et des acteurs, le caractère très diffus et pointu des contributeurs/acteurs, largement mondialisés, rendent lourd et complexe le maillage, qui doit être dynamique car amené à fortement évoluer dans les prochaines années. Cette approche partielle empêche de saisir la globalité des enjeux environnementaux et les risques de transfert d'impacts. De, fait, des études récentes montrent encore seulement que les impacts environnementaux sur les émissions CO₂ durant la phase d'utilisation sont principalement pilotés par le mix énergétique, et que c'est celui-ci qui a un impact majeur sur le résultat final. Cependant d'autres catégories d'impact sont importantes et se doivent d'être considérées.

Vauche et al [3] ont publié une étude à l'échelle des composants semi-conducteurs grand gap de type Nitrure de Gallium (GaN ou GaN/Si) qui détaille l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) de la fabrication du composant. Une analyse complète du berceau à la tombe a ainsi été réalisée pour la fabrication de composants de puissance GaN/Si (de technologie MOSC-HEMT réalisés sur des wafers de silicium de 200 mm). Cette analyse est basée sur des technologies de salles blanches de micro-électronique auxquelles les auteurs ont accès. Les auteurs ont suivi les normes ISO 14040 et ISO 14044 et utilisé la méthode EF3.1 ainsi le logiciel SimaPro et la base de données ecoinvent V3.9 pour traduire en impacts (ACV) l'ensemble de leur Inventaire de Cycle de Vie (ICV). La méthodologie utilisée pour réaliser l'ensemble de l'ICV est présentée sur la Figure 3 : l'inventaire est structuré en trois volets (procédés, équipements et salle blanche), afin de répertorier, pour chacun de ces volets les données d'entrée (c'est à dire les quantités de matériaux, de chimies et d'énergie consommées) ainsi que les données de sortie (quantités d'émissions dans l'air, l'eau, les déchets...).

Certaines données sont directement mesurées au niveau de chaque procédé (données de terrain ou « bottom up »), alors que d'autres sont mesurées à une échelle plus globale comme celles

de la salle blanche, une partie de ces mesures étant ensuite allouée à chaque procédé (données top down).

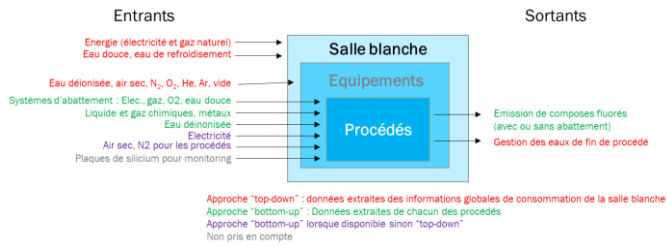


Fig. 3. Diagramme des données d'entrées/sorties pour la fabrication d'un composant semi-conducteur pour constituer l'inventaire du cycle de vie (ICV)

La fabrication des semi-conducteurs est constituée de procédés gourmands en matériaux et en énergie, avec entre 6 et 67 fois plus de métaux nécessaires au procédé que ceux présents dans le wafer final. Au final l'étude montre une consommation de 194 g de produits chimiques (gaz et fluides), 33 L d'eau et 2 kWh d'électricité par centimètre carré de wafer. L'émission directe de gaz à effet de serre tels que les composés fluorés durant les phases de gravure ont aussi un impact élevé sur le changement climatique, et ces émissions peuvent être fortement réduites avec un système d'abatement des gaz dédié. L'étude montre aussi que l'or aussi devrait être autant que possible récupéré à chaque étape du procédé et que sa substitution avec d'autres métaux serait préférable. Ces résultats sont très intéressants et permettent de poser des questions importantes.

Les limites actuelles des travaux de recherche présentés jusqu'à présent résident dans le fait que l'analyse est faite au niveau d'un seul indicateur ou d'un seul composant et ne prend pas en compte les éventuels dividendes environnementaux et/ou transfert d'impact de l'ensemble du système. Les travaux de recherche liés à ce niveau 1 pourraient être peu transformant. Ils restent pour autant clés et doivent être menés en priorité pour alimenter les capacités de prise de décision.

3. NIVEAU 2 : INTERDISCIPLINARITE ET COOPERATIONS

Le niveau 2 de la prospective repose sur le postulat que la soutenabilité en électronique de puissance n'est envisageable que si l'on intègre de nouvelles connaissances et de nouveaux critères pour prendre en compte les impacts environnementaux tout au long de la chaîne de valeur de la filière. Également, le niveau 2 intègre un état des lieux de toute la filière pour qualifier et quantifier, non seulement les performances, mais aussi tous les aspects afférant au domaine. On distingue dans ce niveau deux enjeux qui visent in fine à élargir le spectre des connaissances et compétences et reconquérir des pans de savoir perdus (procédés, chimie, matériaux, technologies, ...) par une trop forte spécialisation et segmentation des activités (les uns reposant sur les autres sans en maîtriser toutes les facettes).

3.1. Évaluer correctement l'impact environnemental d'un convertisseur

La méthode d'Analyse sur Cycle de Vie (ACV) est une méthode normée qui vise à évaluer les impacts environnementaux d'un système ou d'un service sur l'ensemble de son cycle de vie. Elle est basée sur un Inventaire de Cycle de Vie (ICV) auquel on attribue des impacts environnementaux en fonction des dommages écologiques (changement climatique, pollution des éco-systèmes, épuisement des ressources, et atteinte à la santé humaine). C'est une méthode relativement

mature et employée depuis de nombreuses années dans d'autres domaines. En pratique, cette méthode est peu maîtrisée par la communauté électronique de puissance. L'enjeu ici est d'être en mesure d'évaluer correctement l'impact environnemental d'un convertisseur de puissance complet sur tout son cycle de vie et de pouvoir mener une étude comparative pour éco-concevoir le système complet. On est ici au-delà des travaux actuels présentés dans le niveau précédent qui portent soit sur une seule catégorie d'impact (le CO₂ en l'occurrence) [3] soit sur une partie du convertisseur statique [4]. Ces approches ne permettent pas d'appréhender les transferts d'impact que seule une vision globale et contextualisée permet de faire.

Baudais et al. [5] ont réalisé une étude des IE sur un onduleur de traction de véhicule électrique de 150 kW. Les niveaux d'importance des catégories d'impact ont été évaluées, en ne se focalisant pas uniquement sur l'impact CO₂ (Fig. 4).

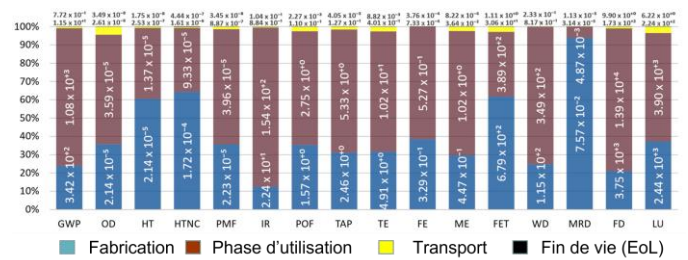


Fig. 4. Résultat d'une ACV d'un onduleur de chaîne de traction VE [5].

Les principaux impacts se situent par ordre d'importance sur les : ressources minérales (MRD), l'eutrophisation de l'eau (FE) et enfin sur la toxicité sur l'homme (HT). Les auteurs précisent que la suite de l'étude devra se concentrer sur les méthodes permettant de réduire ces IE (comme l'utilisation de la modularité ; pour simplifier le désassemblage ; et une meilleure prise en compte du diagnostic de « l'état de santé » du convertisseur). Ce type d'analyse amènera à trouver des solutions globales et sans transfert d'impact. Les résultats de ces travaux, à instruire, permettront d'implémenter des solutions éco-conçues avec pour objectif une quantification sur les bénéfices environnementaux.

Deux verrous liés à cet enjeu sont décrits dans les paragraphes ci-dessous. Le premier verrou est lié au manque de données actuelles et précises sur la grande diversité des composants, matériaux et procédés mis en œuvre en électronique de puissance pour faire des ACV fiables et comparables, c'est-à-dire avec un niveau d'incertitude chiffré. Sa mise en œuvre repose sur les données d'inventaire des flux intrants et sortants couplés à des niveaux d'impacts pour chacun de ces flux. L'électronicien de puissance ne maîtrise plus aujourd'hui toutes les étapes de fabrication des matériaux, composants et sous-systèmes qu'il met en œuvre. Cela ne lui permet pas d'intégrer facilement les éléments clés de chacun dans la prise en compte des impacts environnementaux. Une liste de sous-verrous propres à l'électronique de puissance est proposée :

- Les bases de données environnementales sont incomplètes, notamment vis-à-vis des matériaux et procédés, obsolètes ou difficilement mises en perspective du système réel.
- Les scénarios de fin de vie sont variés (et peuvent être questionnés vis-à-vis de leur pertinence pour l'électronique de puissance) et leur modélisation dans les logiciels d'ACV est difficile voire inexistante

- L'opacité vis-à-vis des données fiables et existantes, souvent liée aux contraintes industrielles (relative à la protection intellectuelle), est un verrou important qui limite aussi fortement la mise en œuvre d'ACV fiables.
- L'inventaire complet (ICV) demande un temps important pour faire la collecte de données (paramétrisées ou non) du fait que beaucoup de sous-systèmes ne sont pas documentés.

L'illustration présentée dans la Figure 5 ci-dessous souligne l'ampleur et la diversité de la tâche. Dans cette image, chaque point d'interrogation matérialise l'absence de données d'inventaire au niveau de chaque étape du cycle de vie.

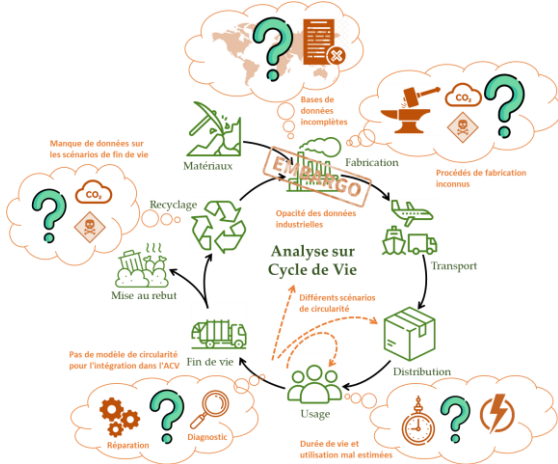


Fig. 5. Illustration des données manquantes à ce jour pour mener une ACV sur tout le cycle de vie d'un convertisseur d'électronique de puissance.

Le second verrou mis en avant est l'intégration de la fiabilité dans les conduites d'ACV [5]. Cela implique de pouvoir travailler avec des électroniciens de puissances spécialisés dans la fiabilité et la durée de vie à divers niveaux du système (matériaux, composants, sous-ensemble et convertisseurs) pour pouvoir intégrer ces paramètres clés dans l'ACV. En ce sens l'exemple des travaux de Mitsubishi est intéressant car le logiciel développé permet d'intégrer des données liées à la fiabilité et à la réparabilité [8]. Si la durée de vie du système impacte fortement les impacts environnementaux de ce dernier, prendre en compte la fiabilité est un verrou clé mais aussi une passerelle nécessaire en vue du niveau 3 et du choix des scénarios de fin de vie.

Des pistes sont envisagées pour répondre aux deux verrous proposés ci-dessus. Un premier moyen serait que l'ensemble des acteurs industriels opèrent avec plus de transparence sur leurs données matériaux, procédés et environnementales. Pour des raisons de confidentialité et de concurrence, cette transparence nécessite un cadre réglementaire. Ce cadre commence à être défini et certaines déclarations (rapports de RSE/soutenabilités, CRSD) doivent être faites par les entreprises (consommations d'eau, d'électricité, émissions CO₂...), cependant ces déclarations restent insuffisantes au regard de l'ensemble des IE.

Si l'on ne peut pas compter à court terme sur un cadrage légal pour le partage des données d'impact, il est envisageable de développer des modèles d'ICV (paramétrés ou pas) qui permettraient de faire des estimations et des comparaisons suffisamment efficaces pour orienter les choix de conception. Pour cela, la communauté académique doit s'organiser pour partager et mettre en accès libre et reproductible tous les résultats

obtenus pour capitaliser. La mise en libre accès des bases et travaux de la communauté est également un point clé pour limiter les difficultés liées aux données. Plusieurs approches collaboratives pour pallier ce manque sont proposées : co-développement de projets ACV, accords de non-divulgence (NDA), plates-formes collaboratives, communautés open data.

Si les entreprises ne peuvent pas s'inscrire dans une approche collaborative, les seules solutions restent la mise en place de veilles techniques pour extraire des données à partir de brevets ou de « reverse engineering », ou encore de veilles scientifiques pour exploiter les publications académiques et les rapports techniques relatifs à la soutenabilité des entreprises.

3.2. Classifier la diversité des acteurs et des applications

Trop longtemps négligés, le maillage, la connaissance et la classification des différents acteurs et domaines de l'électronique de puissance deviennent incontournables pour appréhender toutes les facettes des impacts environnementaux de la technologie électronique de puissance. Par ailleurs, il paraît assez improbable qu'une seule approche de circularité puisse être adaptée à l'ensemble du domaine de l'électronique de puissance. Il convient donc d'identifier les acteurs des filières, des fournisseurs jusqu'aux intégrateurs finaux, les grands types de technologies par domaines applicatifs, et cela du « berceau à la tombe ». Une classification par rapport aux principales technologies (par exemple les technologies d'interconnexion et d'assemblage) et/ou par rapport aux niveaux de puissance pourrait faire du sens. En effet, la puissance est liée à la technologie et la technologie est un élément clé des options de circularité (une technologie PCB de faible puissance n'apporte pas les mêmes options de circularité qu'une technologie forte puissance type « busbar » à assemblages et interconnexions mécaniques). Un exemple est proposé sur la Fig.6.

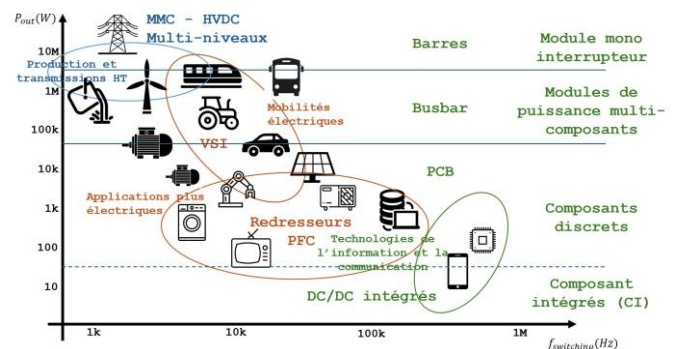


Fig. 6. Illustration des filières d'électronique de puissance en fonction de la puissance et de la densité d'intégration (jugée ici proportionnelle à la fréquence de découpage)

Un tel maillage vertical, au niveau de toute la chaîne de valeur en électronique de puissance, implique un travail d'élargissement des connaissances et de la compréhension des actions, rôles et besoins de ces différents acteurs. Cela peut par exemple passer par la mise en œuvre d'entretiens de ces acteurs. Cependant l'exploitation de ces entretiens nécessite encore un cadre permettant de rendre les données de sortie utilisables simplement par d'autres techniciens/ingénieurs/chercheurs en particulier lors des restitutions vers la communauté.

3.3. Acteurs à mobiliser pour accomplir le niveau 2

Le milieu industriel est le mieux placé pour compléter les lacunes sur les bases de données et les inventaires. On parle ici de tous les acteurs de la chaîne de valeur, depuis la production

des matériaux jusqu'au recyclage en passant par les concepteurs, producteurs, incluant par exemple les logisticiens. En attendant que la réglementation les « invite » à plus de transparence et de partage dans les données, les académiques ont un rôle à jouer pour suppléer les manques les plus importants en termes de cartographie des filières mais aussi des données etc... L'affaire n'est pas uniquement celle des électroniciens de puissance mais aussi celle des experts des domaines des technologies, de la chimie et des matériaux et procédés.

4. NIVEAU 3 : CONCEPTION POUR LA CIRCULARITE

Le niveau 3 de la prospective repose sur la remise en question des pratiques de conception et d'optimisation traditionnelles, l'introduction de nouveaux indicateurs et nouvelles règles de conception pour faire remonter la prise en compte des impacts environnementaux au plus tôt dans toutes les prises de décision en lien avec le produit. Il intègre des enjeux des Sciences Humaines et Sociales et des Sciences Économiques et Sociales pour agir sur les filières.

L'un des principaux enjeux de niveau 3 vise à faire évoluer la conception des convertisseurs d'électronique de puissance pour les rendre plus facilement réutilisables, réparables et reconditionnables, dans leur ensemble ou par sous-briques [6]. L'enjeu réside également dans l'amélioration des conditions de recyclage via une prise en compte des contraintes associées dès la conception du convertisseur. Ce schéma de réflexion se veut être vertueux pour favoriser la réutilisation [7] dans le but de limiter la pression sur l'environnement (épuisement des ressources et pollutions) et il convient ainsi d'arriver à les quantifier à l'aide d'Analyses de Cycle de Vie qui ne se bornent plus au produit mais prennent en compte le contexte des usages, des flottes de produits et des nombreuses opportunités pour maintenir les valeurs fonctionnelles et résiduelles des appareils [8]. Dans ce cadre, des indicateurs nouveaux seront amenés à être développés pour accompagner le concepteur dans l'évolution de ses pratiques et choix.

Le premier verrou consiste ici à évaluer les impacts économiques et environnementaux de nouvelles architectures et agencement des composants, sous-fonctions et fonctions favorisant la circularité (modularité, standardisation, découpage fonctionnel, diagnosticabilité, démontabilité,...). Cet enjeu adresse le besoin de faire le lien entre différents scénarios de circularité en fin de vie, et les méthodes d'évaluation des impacts environnementaux. Cela revient à pouvoir diagnostiquer l'état d'un convertisseur vis-à-vis de différents scénarios et à modéliser correctement ces scénarios pour les intégrer à la méthode d'Analyse sur Cycle de Vie.

Le second verrou identifié est le diagnostic du convertisseur en fin d'usage en vue de son réemploi. Lorsqu'un convertisseur arrive en « fin de vie », il n'est aujourd'hui pas commun de décrire son état de santé, ce qui interdit donc d'imaginer un scénario de fin d'usage et de réemploi. La grande diversité de convertisseurs, d'applications, de composants, de scénarios de fin d'usage, complexifie fortement le fait d'aboutir à des méthodes de diagnostic ou à la quantification de la valeur résiduelle en fin de vie.

Le troisième verrou consiste en la démontabilité des convertisseurs. La conception n'intégrant aujourd'hui pas la circularité, les convertisseurs ne sont pas pensés pour être démontables. Il faudrait donc proposer une méthodologie

d'évaluation de la démontabilité du système [6], avec des indicateurs de temps et facilité. Enfin, des innovations seront nécessaires pour concevoir des convertisseurs démontables, tout en conservant des niveaux de performance techniques, économiques et environnementaux satisfaisants. Pour cela, [9] propose de cibler les réparations et remplacer uniquement les composants et sous-ensembles défectueux grâce à un diagnostic précis et de la modularité.

Un second enjeu d'ordre méthodologique est proposé au sein de ce niveau, autour de l'intégration des indicateurs de soutenabilité dans les outils de conception. Si l'ACV est capable de fournir des indicateurs de soutenabilité (GWP, MRD, etc...), elle ne permet pour l'instant pas d'agir sur la conception. Aucune recommandation ne sort d'une ACV. Le verrou identifié ici questionne l'intégration de ces deux types d'indicateurs, issus d'outils différents. L'adoption d'une démarche d'éco-conception peut être menée soit par l'ACV [10], en guidant l'utilisateur dans la conception à partir des résultats issus des outils d'ACV existants, soit par des modèles technologiques [11-12], en utilisant des indicateurs de soutenabilité dans les outils classiques existants. De récents développements proposent d'intégrer ces contraintes dans la conception grâce à des algorithmes d'optimisation.

Deux enjeux non-techniques sont finalement proposés pour compléter ce troisième niveau, autour d'aspects sociétaux et éthiques :

- Identifier les freins et leviers non techniques à l'évolution de ces architectures, en fonction du domaine applicatif.
- Identifier les filières critiques et les scénarios de circularité associés, pour lesquels il faut adresser la circularité en priorité. En effet, la diversité de ce domaine implique de ne pas pouvoir tout traiter d'un coup.

L'intégration de nouvelles pratiques et de nouveaux acteurs dans la chaîne de valeur repose sur une mobilisation de l'ensemble des acteurs. Il faudra renforcer les acteurs de l'économie circulaire qui auront investi les gisements de valeurs ajoutées économiques et de préservation de la valeur résiduelle. Les milieux académiques des sciences humaines, sociales et économiques seront à associer très largement avec les acteurs historiques de la filière pour accompagner le changement et voir comment le déployer. Les décideurs et les acteurs de la réglementation auront des rôles majeurs à jouer pour apporter un cadre légal et réglementaire adapté aux nouveaux modèles économiques.

5. NIVEAU 4 : TRANSFORMATIONS SOCIO-ECONOMIQUES

La prospective de niveau 4 repose sur un ensemble de ruptures principalement non techniques visant à rendre la filière soutenable. Il est sous-entendu ici que les techno-solutions ne pourront pas rendre la filière soutenable et que des évolutions plus profondes seront à envisager. On parle ici de nouveaux modèles socio-économiques, du passage d'une économie de marché/possession à une économie de service et de la fonctionnalité, de la mutualisation des usages, de la réduction voire du renoncement à certains types d'usages. Les travaux de recherche à mener autour de la transformation de la filière électronique de puissance présentent les plus gros gisements de réduction des impacts, mais c'est aussi un chantier conséquent à mener, avec une acceptabilité faible et une difficulté importante.

La prospective de niveau 4 est caractérisée par une forte transversalité au niveau des acteurs, des technologies et des applications, pour rationaliser le plus possible la filière à travers la standardisation à différents niveaux (composants, technologies d'assemblage, fonctions, topologies, etc...) en complément d'une forte réduction des degrés de liberté au niveau de la conception et de la production, pour simplifier au maximum la circularité. Cette forme de convergence doit renforcer la viabilité économique de l'économie circulaire au dépend d'économie de marché.

Le premier enjeu identifié ici consiste à évaluer la soutenabilité d'un système à l'échelle de la société, identifier le chemin qui reste à parcourir et les conditions pour l'atteindre. Il est vraisemblable que pour atteindre une soutenabilité forte des convertisseurs, des évolutions majeures soient nécessaires. Ici, l'important pourrait être la définition des seuils de soutenabilité, via la mise en place par exemple d'une ACV absolue, qui permet de comparer les impacts produits sur cycle de vie avec une limite qui garantit le respect des limites planétaires [13].

Le verrou associé à cet enjeu est autour des seuils à fixer par catégorie d'impact pour chaque type de convertisseur, pour chaque typologie d'utilisateur. Il s'agit ici d'être en mesure de fixer des limites d'impacts environnementaux sur un dispositif dans un contexte applicatif donné et pour un usage et par un usager donné. Ce verrou paraît assez lointain, et donc difficile à appréhender. Pourtant, la réponse attendue, souhaitée ou redoutée se tient au niveau de ce verrou, qui conduit la filière à la soutenabilité !

Le second enjeu développé ici s'intéresse à l'intégration des approches socio-économiques et alternatives dès la conception. L'objectif est de consolider le déploiement d'une économie circulaire en électronique de puissance, totalement ou partiellement (réutilisation, réparation, remise à neuf, reconfiguration, recyclage, ...). Par exemple, l'effet rebond est à surveiller. Comme les gains en performances amènent à davantage d'usages, il est probable que la production de convertisseurs moins impactant aura pour conséquence une augmentation de la production. La spirale infernale ne touchera à sa fin que si le régulateur intervient et si les usages et les pratiques évoluent. On semble ici assez loin du cadre technique de l'électronicien de puissance. Et pourtant, il lui appartiendra, tout d'abord de reconnaître les limites de la techno-solution, puis d'apporter des réponses au déploiement de nouvelles économies et de nouvelles pratiques, telles que la mutualisation, le partage, la gestion des flottes de dispositifs, autant de solutions pour lesquelles la technologie devra être au rendez-vous !

Le verrou associé consiste à concevoir des convertisseurs de puissance compatibles avec les transformations des modèles socio-économiques. Pour engager la filière vers la soutenabilité forte, respectant les limites planétaires, il faudra à coup sûr rationaliser et standardiser massivement à tous les niveaux. Il faudra consolider les pratiques d'économie circulaire et engager les acteurs vers des économies de la fonctionnalité dans lesquelles l'usager final pourrait ne plus être le propriétaire du dispositif. Le convertisseur, étant souvent un sous-ensemble d'un produit final, devra être démontable, réparable, reconditionnable, réutilisable, à l'infini.... La production de nouveaux dispositifs étant alors moins la norme, il faudra déplacer la valeur ajoutée vers le service et la qualité des

dispositifs de conversion. Les notions de territorialisation et de relocalisation auront un rôle majeur dans la structuration des filières.

6. CONCLUSION

Cet article présente le travail collaboratif d'un groupe de chercheurs de différentes sensibilités. Il propose une structuration de la recherche sur la soutenabilité en électronique de puissance selon 4 niveaux, des recherches actuelles jusqu'à des transformations socio-économiques.

Les niveaux 1, 2 et 3 sont encore assez liés à une vision technico scientifique proche de ce que les chercheurs font aujourd'hui au quotidien. L'analyse du cycle de vie apparaît largement dans les niveaux 1 et 2, mais dans sa forme actuelle, elle est aussi insuffisante en électronique de puissance pour permettre des gains environnementaux substantiels. Le niveau 3 montre le besoin de nouveaux indicateurs pour aboutir à des ruptures technologiques capables de réduire les pressions sur l'environnement. L'ACV prospective sera un outil important. Pour autant, il est probable que les travaux menés sur les niveaux 1, 2 et 3 restent insuffisants pour atteindre la soutenabilité de la technologie électronique de puissance. Il sera du devoir de la communauté de le reconnaître le plus tôt possible pour engager de nouvelles perspectives. Le niveau 4, qui est le plus vertueux, le seul qui soit réellement soutenable, est lui plus lié à une mutation profonde de notre société de consommation et de notre économie vers un monde où la soutenabilité forte sera un préalable à tout développement. Au niveau R&D, il repose sur de fortes interactions avec les SHS, la mobilisation des territoires et des citoyens.

7. REFERENCES

- [1] C. P. Baldé et al., "The Global E-waste Monitor 2024," International Telecommunication Union (ITU) and United Nations Institute for Training and Research (UNITAR), 2024.
- [2] B. Allard et al., "Etat de l'art de la recherche vers une électronique de puissance soutenable." SGE 2023, Conférence in Lille, France, 2023
- [3] F. Musil et al. "How Life Cycle Analyses are Influencing Power Electronics Converter Design", PCIM Europe 2023 Germany, pp. 1-9, doi: 10.30420/566091368.
- [4] Vauche, Laura, et al., "Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment (LCA) of GaN Power Semiconductor Device" Sustainability 2024, 16, no. 2: 901. <https://doi.org/10.3390/su16020901>
- [5] B. Baudais et al. "Life Cycle Assessment of a 150 kW Electronic Power Inverter", 2023, Energies, vol. 16, no 5, doi: 10.3390/en16052192.
- [6] T. Turkbay Romano et al., "Disassemblability Assessment of Power Electronic Converters for Improved Circularity", Sustainability, vol. 16, no. 11, p. 4712, May 2024, doi: 10.3390/su16114712.
- [7] J. Alinei et al., "Améliorer la réparabilité des systèmes techniques, une proposition méthodologique basée sur la documentation collaborative-Exemple/cas d'un convertisseur de puissance open source", in Symposium de Génie Electrique, 2023. Disponible sur: <https://inria.hal.science/hal-04798159/>
- [8] L. Riondet, « Vers l'éco-conception de technologies émergentes : prise en compte du changement d'échelle dans l'analyse de cycle de vie », Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes 2024. Disponible sur: <https://theses.fr/2024GRALI044>
- [9] B. Baudais, "Écoconception en électronique de puissance. Impacts du dimensionnement, de la modularité et de la diagnosticabilité", Thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, 2024. : <https://theses.hal.science/te1-04659788>
- [10] L. Fang et al. "Parametric LCA model for power electronic ecodesign process: Addressing MOSFET-Si and HEMT-GaN technological issues", IET Power Electronics, vol. 18, no 1, p. e12844, 2025, doi: 10.1049/pe12.12844.
- [11] L. Imperiali et al., « Multi-Objective Minimization of Life-Cycle Environmental Impacts of Three-Phase AC-DC Converter Building Blocks », in 2024 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), févr. 2024, p. 2994-3004. doi: 10.1109/APEC48139.2024.10509190.
- [12] A. Voldoire, "Sustainability Indicators Integration into the Optimal Design Methodology of Power Electronic Converters", in 2024 IEEE Design Methodologies Conference (DMC), nov. 2024, p. 1-6. doi: 10.1109/DMC62632.2024.10812128.
- [13] J. Rockström et al., "The planetary commons: A new paradigm for safeguarding Earth-regulating systems in the Anthropocene". Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A., vol. 121, no 5, p. e2301531121, janv. 2024, doi: 10.1073/pnas.2301531121.