

# État de l'art de la recherche vers une électronique de puissance soutenable

*La* Revue 3E.I

Culture Sciences  
de l'Ingénieur

Bruno Allard<sup>1</sup>, Morgan Almanza<sup>2</sup>, Matthieu Beley<sup>1</sup>, Hamid Ben-Ahmed<sup>3</sup>,  
Daniel Chatroux<sup>4</sup>, Antoine Cizeron<sup>2</sup>, Jean-Christophe Crébier<sup>6</sup>,  
Laurent Dupont<sup>7</sup>, Murielle Fayolle-Lecocq<sup>8</sup>, Suzanne Guillou<sup>8</sup>,  
Vincent Grennerat<sup>6,9</sup>, Hugo Helbling<sup>1</sup>, Pierre-Olivier Jeannin<sup>6</sup>,  
Lionel Laudebat<sup>10</sup>, Boubakr Rahmani<sup>11</sup>, Florentin Salomez<sup>6</sup>,  
Ulrich Soupremanien<sup>4</sup>, Paul-Étienne Vidal<sup>12</sup>, Luiz Villa<sup>13</sup>,  
Guillaume Vine<sup>12</sup>, Adrien Voltaire<sup>5</sup>

Édité le  
07/01/2025

école  
normale  
supérieure  
paris-saclay

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

<sup>2</sup> Université Paris-Saclay, ENS Paris-Saclay, CNRS, Laboratoire SATIE

<sup>3</sup> ENS Rennes, SATIE, CNRS, BRUZ France

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

<sup>5</sup> Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, Laboratoire de Génie Électrique et Électronique de Paris, 91192, Gif-sur-Yvette, France

Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire de Génie Électrique et Électronique de Paris, 75252, Paris, France

<sup>6</sup> Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2ELAB, 38000 Grenoble, France

<sup>7</sup> Univ. G. Eiffel, Laboratoire SATIE - ENS Paris-Saclay, CNRS, 4 avenue des Sciences, 91192, Gif-sur-Yvette

<sup>8</sup> CEA-Leti, Univ. Grenoble Alpes, F-38000 Grenoble, France

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

<sup>10</sup> Laplace, Université de Toulouse, CNRS, INPT, UPS, Toulouse, France

<sup>11</sup> CEA, CEA Tech Pays de la Loire, F-44340 Bouguenais, France

<sup>12</sup> Univ. Toulouse, INP-ENIT, LGP, 65000 Tarbes, France

<sup>13</sup> LAAS-CNRS, 7 avenue du Colonel Roche, 31031, Toulouse, France

*Cette ressource fait partie du N° 114 de La Revue 3EI du 1<sup>er</sup> trimestre 2025.*

La soutenabilité en électronique de puissance est un sujet de recherche récent. Il s'inscrit dans les actions en cours visant à mieux appréhender les choix de conception favorisant notamment l'écoconception et l'économie circulaire dans le domaine.

Le présent article révèle le résultat et l'analyse d'un travail de recherche bibliographique à l'intersection des domaines de l'électronique de puissance et de la soutenabilité, en dehors des activités de recherche en lien avec la fiabilité des systèmes de conversion d'énergie. La première partie énonce le cadre retenu pour mener à bien le travail. La seconde partie expose une analyse bibliométrique des documents collectés faisant ressortir clairement un positionnement précurseur au niveau européen. La troisième partie présente l'état de l'art et son analyse pour cinq axes d'investigation qui sont : les outils et méthodes, les indicateurs, la circularité, les matériaux et les filières et communautés.

Cet article et le travail qu'il présente sont le fruit d'une collaboration à l'échelle nationale dans le cadre du GT CEPPS (Convertisseurs Électronique de Puissance Plus Soutenable) porté par le GdR SEEDS.

## 1 - Contexte

L'électronique de puissance est au cœur de la transition énergétique. Elle assure l'adaptation des grandeurs électriques issues des sources d'énergies notamment renouvelables ou consommées par les diverses charges modernes. De nombreux travaux de recherche ont permis de développer des systèmes de conditionnement de l'énergie électrique de plus en plus efficaces, à hautes densités de puissance, fiables et de moins en moins coûteux. L'émergence de nouvelles technologies et de nouveaux matériaux, associée à la découverte de nouvelles architectures de conversion sont à l'origine de ces progrès continus. Compagne du vecteur électricité, l'électronique de puissance pénètre un à un tous les secteurs applicatifs de nos sociétés modernes. Avec elle, de nouveaux produits et de nouveaux besoins induisent une pression accrue sur les matériaux critiques, mais aussi sur les limites planétaires sous contraintes économiques et sociétales [1,2]. Il devient pressant de mieux appréhender les impacts environnementaux induits par la technologie et d'introduire dans les processus de conception et de production des contraintes environnementales qui conféreront davantage de soutenabilité à l'électronique de puissance. Le Groupe de Travail CEPPS (Convertisseurs Électronique de Puissance Plus Soutenables) du GdR SEEDS (Systèmes d'Énergie Électrique dans leurs Dimensions Sociétales) a été créé pour structurer une communauté scientifique autour de cette problématique et tenter de faire l'état des lieux des activités de recherche et de dégager des pistes en faveur d'une électronique de puissance plus soutenable [3]. À l'intérieur du GT, et compte tenu de l'étendue de la thématique de travail, cinq axes complémentaires ont été définis. Il s'agit des axes « outils et méthodes », « indicateurs », « circularité », « matériaux » et « filières et communautés ».

Cet article, fruit d'une première étape, présente l'état de l'art que le GT a pu construire sur l'ensemble de l'année scolaire 2022-23. Il expose rapidement une analyse bibliométrique de l'état de l'art réalisé. La suite de l'article présente une synthèse de l'état de l'art dans le domaine selon les cinq axes de prospection. Pour chaque axe, les documents les plus pertinents sont référencés et pour certains, des éléments de réflexions sont proposés.

## 2 - Méthode de collecte et d'analyse en groupe

Le GT CEPPS a été également soutenu par un financement sur projet interne 2022 du GdR SEEDS pour commander une extraction bibliographique qui a été confiée à la société TKM, localisée en France à Voiron [4]. Des échanges avec le prestataire ont permis de définir les contours de la prestation en combinant deux groupes de mots clés, l'un correspondant au domaine de l'électronique de puissance et l'autre au domaine de la soutenabilité, les mots clés étant tous définis en anglais. Les deux listes de mots sont disponibles sur le site du GT CEPPS à l'adresse suivante [3]. 17000 références ont pu être identifiées, avec environ 10000 brevets et 7000 articles, tous sur la période 2010 à fin 2022. Rapidement, nous avons identifié que la quasi-totalité des brevets ne répondait pas totalement au cadre de la recherche bibliographique et nous nous sommes concentrés sur les publications scientifiques. Ici aussi un important travail de tri a été réalisé par les auteurs de l'article pour ne sélectionner que les articles vraiment en lien avec la thématique scientifique. Au final, plus de deux cents articles ont été retenus pour leur apports scientifiques aux domaines des outils et méthodes, des indicateurs, de la circularité et des matériaux et procédés de fabrication, tous en lien avec une électronique de puissance plus soutenable. Cette liste d'articles est disponible sur la page web du GT [3].

Ce premier état de l'art a été largement complété par un travail mené dans chacun des axes du GT sur la base des connaissances propres des membres du GT. L'analyse par axe des références les plus pertinentes fait l'objet de la liste discutée dans cet article. Elle comprend environ 60 articles, sélectionnés pour la valeur ajoutée qu'ils apportent à l'électronicien de puissance qui souhaite

approfondir ses connaissances de l'état de l'art de la soutenabilité dans le domaine. Cette liste n'est pas exhaustive, mais elle représente à nos yeux une très bonne base de départ.

### 3 - Analyse bibliométrique

Sur les 230 publications scientifiques issues de l'extraction via l'outil IPMETRIX et jugées pertinentes par les auteurs, une analyse bibliométrique a été réalisée [4]. Cette analyse a porté sur l'identification des principaux acteurs, les grands pôles géographiques actifs dans le domaine et l'intensité de l'activité de recherche. En ce qui concerne le dernier point, le nombre de publications identifiées permet sans équivoque de dire que l'activité à ce stade, si elle existe, n'a pas donné lieu à de nombreuses publications scientifiques. Le graphique ci-dessous (Figure 1) permet de mettre en évidence que l'activité est faible jusqu'en 2017 et qu'à partir de cette date elle augmente régulièrement. La stagnation en 2020-2021 est probablement due au COVID-19, la plupart des publications étant des articles de conférences. Par ailleurs, les données de l'année 2022 resteraient à consolider du fait de la période de latence nécessaire au recensement des publications.

Pour ce qui concerne les principaux acteurs, aucun centre de recherche n'est clairement ressorti de l'analyse bibliométrique, les plus publiant étant de l'ordre de quelques articles. Pour ce qui concerne les grandes zones géographiques, sans trop d'incertitude les trois pôles Amérique du Nord, Europe et Asie (Chine principalement) concentrent la majeure partie des publications comme cela est illustré avec le graphique ci-dessous (Figure 2). Il est intéressant de noter que la zone géographique la plus intense dans le domaine devient clairement l'Europe si l'on regroupe les contributions des pays qui la compose.

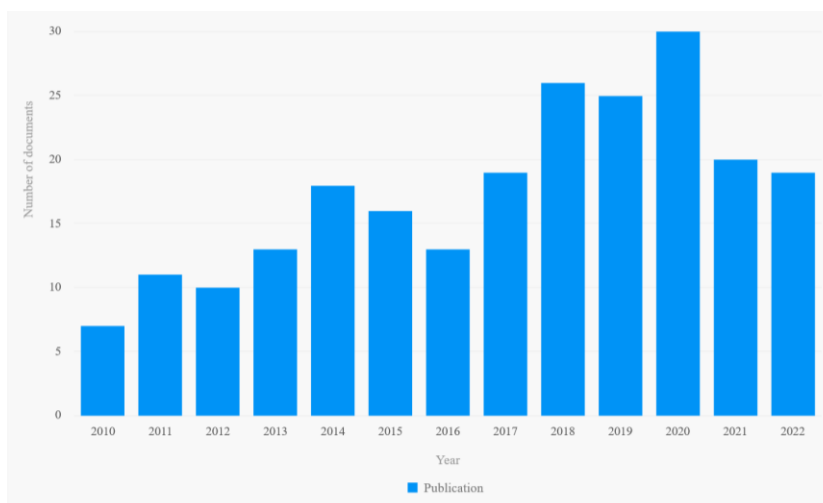


Figure 1 : Distribution temporelle des publications scientifiques en lien avec le sujet.

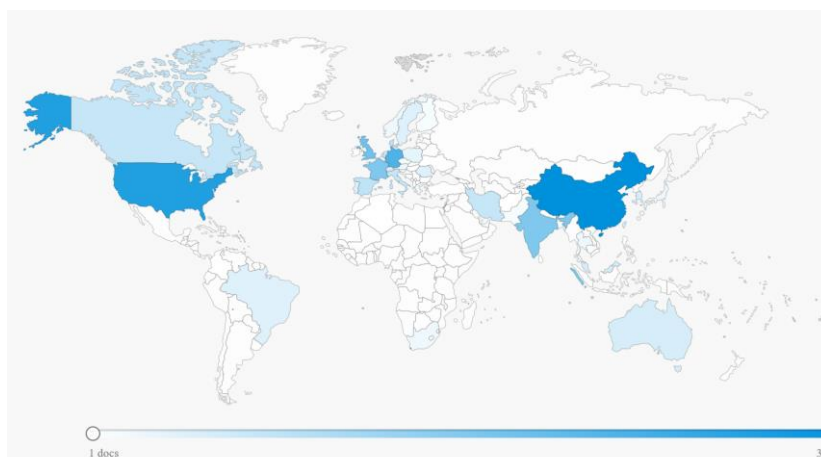


Figure 2 : Distribution géographique des publications scientifiques en lien avec le sujet.

Les compléments à l'état de l'art apporté par les membres du GT ne remettent pas en question des conclusions tirées ici par l'analyse bibliométrique réalisée avec l'outil IPMETRIX. Peu d'articles sont disponibles à ce jour, aucun centre de recherche à l'échelle internationale ne ressort vraiment et l'Europe semble plutôt bien placée dans le nombre et la pertinence des contenus avec le sujet traité.

## 4 - Analyse de l'état de l'art bibliographique

Cette partie est consacrée à la présentation et l'analyse bibliographique des activités de recherche menées dans le domaine de l'électronique de puissance plus soutenable. Elle est organisée selon les cinq axes de travail précités.

### 4.1 - Axe Outils et Méthodes

Le développement de convertisseurs d'électronique de puissance (EP) plus soutenables repose sur la prise en compte d'indicateurs environnementaux et technologiques, et nécessite d'adopter des méthodes et outils pour quantifier et analyser les impacts sur l'environnement durant l'ensemble du cycle de vie. L'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est une méthode pertinente pour réaliser un bilan environnemental, et standardisée par les normes ISO 14040 et ISO 14044. D'autres méthodes pour favoriser une conception plus durable et plus fiable peuvent être choisies, comme par exemple les analyse AMDEC, qui ne sont pas traitées dans cet article.

Une ACV débute par la définition de l'objectif et du champ de l'étude. Dans le champ d'étude, il est indispensable de définir l'unité fonctionnelle. Cette dernière permet de poser les frontières de l'étude et de préciser quantitativement l'usage afin de pouvoir réaliser des éventuelles études comparatives.

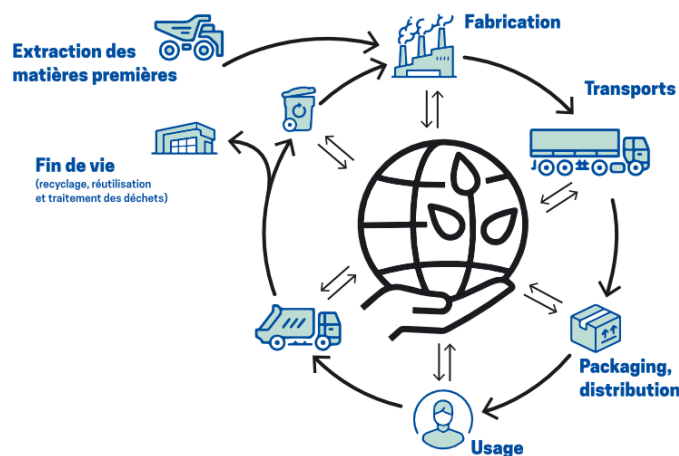


Figure 3 : Illustration schématique d'une ACV  
(<https://www.elsa-pact.fr/L-abecedaire-de-l-ACV/Qu-est-ce-que-l-ACV>)

Par exemple, pour un convertisseur, il s'agira de préciser le nombre d'heures total de fonctionnement (durée d'usage) sous une certaine sollicitation électrique (profil de puissance). S'ensuit un Inventaire du Cycle de Vie (ICV), qui consiste en premier lieu à répertorier les flux entrants (matières, énergies) et sortants (polluants) du convertisseur, comme les matériaux, l'énergie consommée, les déchets générés, etc, au cours des différentes étapes de la vie d'un produit (extraction des matières premières, fabrication, transport, usage, tri et fin de vie)... Il est à noter que la durée d'usage n'est pas nécessairement égale à la durée de vie. Un modèle d'estimation de cette dernière (vieillesse) est donc nécessaire pour réaliser une ACV complète.

La traduction de chacun de ces flux en impacts environnementaux est réalisée au cours de l'ACV à l'aide d'une base de données qui relie chaque flux aux différents indicateurs d'impact environnementaux sélectionnés dans l'étude (ex : changement climatique, consommation

d'énergie, consommation d'eau...). Il est ici nécessaire de faire appel à une Base de Données (BdD) la plus précise et exhaustive possible, et de connaître les mécanismes de fin de vie du produit. Le Tableau 1 répertorie quelques BdD potentiellement pertinentes pour l'électronique de puissance.

Nom	Licence	Remarque
Empreinte	Gratuite	Fournie par l'ADEME, peu adaptée à l'électronique
Ecolnvent	Payante	Bien documentée mais données insuffisantes pour l'électronique
Nexus	Payante	Recueil de BdD accessible depuis OpenLCA

Tableau 1 : Quelques Bases de Données potentiellement pertinentes pour l'électronique de puissance

Les bases de données disponibles présentent toutes des incertitudes/erreurs vis-à-vis d'un produit précis.

Pour pallier ces problèmes, la base de données Ecolnvent a commencé à publier, dans sa version 1.01 de 2003, des informations sur la qualité des données sous forme de matrices de pedigree. Ces informations permettent de caractériser de manière quantitative les incertitudes sur les données. L'étape fastidieuse de collecte est alors réduite pour les utilisateurs de la base de données. Dans des outils d'ACV tels que SimaPro ou Umberto, des méthodes de propagations d'incertitudes avec la méthode Monte-Carlo sont mises en place dès 2004.

Il est donc indispensable d'adjoindre à toute ACV une étude de sensibilité de ces incertitudes sur les impacts environnementaux du produit considéré.

La qualité de l'inventaire s'avère particulièrement complexe en électronique de puissance à cause du caractère hétéroclite et hétérogène des composants et procédés technologiques mis en œuvre. L'état actuel des BdD présentées dans le Tableau 1 ne permet pas d'obtenir des résultats fiables dans notre domaine.

Cet état de fait motive certains travaux de recherche, comme celui de la référence [5] qui présente un ICV d'un onduleur de traction électrique de véhicule, en se focalisant sur les matériaux utilisés. Ce travail est complémentaire de [6] qui complète l'ICV avec des données sur les processus de fabrication. Les auteurs ont développé un outil qui permet d'estimer les masses des principales fonctions d'un onduleur en fonction de ses caractéristiques (tension, puissance, type de refroidissement). La figure 4 présente deux exemples d'inventaire de deux onduleurs de puissances différentes. L'inventaire présenté ne peut pas alimenter une ACV ; il s'agit d'une représentation macroscopique d'un inventaire détaillé.

En complément, la référence [7] présente des travaux sur le recyclage des convertisseurs de véhicules électriques. Ces travaux s'appuient sur le démontage de 15 convertisseurs différents. Dans [8], les auteurs discutent des processus de fabrication et de la fin de vie de composants pour les convertisseurs (transistors, condensateurs, inductances) au moyen d'un état de l'art détaillé. Ces quelques références, en faible nombre, illustrent les niveaux de connaissance et de données disponibles pour mener à bien un inventaire et une analyse de cycle de vie dans le domaine d'EP. Pourtant, la connaissance précise des quantités de matières et d'énergies engagées dans la fabrication et des divers procédés mis en œuvre est déterminante pour bien évaluer les impacts environnementaux liés à un convertisseur statique.

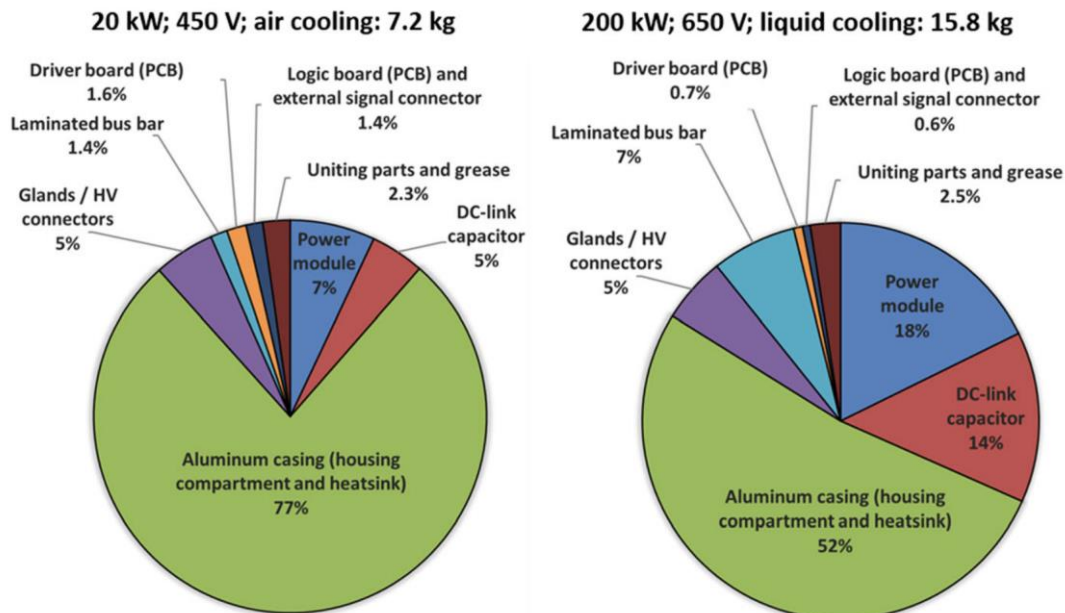


Figure 4 : Inventaire des composants présents dans deux onduleurs [5]

La seconde étape consiste à choisir une méthode de résolution adaptée aux objectifs et au champ de l'étude. On distingue deux types de méthodes :

- Les méthodes orientées problèmes (mid-point), qui fournissent des indicateurs intermédiaires (Changement climatique GWP, Écotoxicité, Appauvrissement de la couche d'ozone, Consommation d'eau, Épuisement des ressources fossiles, Eutrophisation, Toxicité humaine, etc.) ;
- Les méthodes orientés dommages (end-point), qui quantifient les dommages finaux (Impact sur la santé humaine, Réchauffement climatique, etc.).

Une ACV est finalement réalisable au moyen d'un outil logiciel, dans lequel sont renseignés pour chaque étape du cycle de vie les flux élémentaires entrants et sortants. L'outil est également paramétré pour fournir en sortie des jeux d'indicateurs en fonction de la méthode de calcul d'impact. Le choix de l'outil logiciel dépend de plusieurs critères dont en particulier les BdD matériaux et procédés et méthode de calcul vis-à-vis des produits considérés. Le Tableau 2 répertorie quelques logiciels d'ACV potentiellement pertinents pour l'électronique de puissance. La référence [9] présente un bon exemple pédagogique d'une ACV appliquée à un panneau photovoltaïque.

Nom	Licence	Caractéristiques
OpenLCA	gratuite	Beaucoup de méthodes. Beaucoup de BdD compatibles via Nexus.
SimaPro	payante	Beaucoup de méthodes de calcul disponible. Pas de BdD associée, mais compatible avec de nombreuses BdD externes.
GabiLCA	payante	Centré sur l'automobile, mais peu de données pour l'EP. Beaucoup de méthodes. L'aspect boîte noire diminue la fiabilité des résultats.
Brightway 2	gratuite	Beaucoup de liberté dans le paramétrage. Temps de calcul court en extrayant une empreinte globale, au prix de la perte d'information sur le détail
EIME	payante	Centré sur l'électronique, avec une BdD associée. Facile à utiliser, mais peu de méthodes de calcul.

Tableau 2 : Quelques logiciels d'ACV potentiellement pertinents pour l'électronique de puissance

Certains travaux de recherche commencent à appliquer ces outils d'ACV en électronique de puissance. Une ACV d'un onduleur 150 kW est présentée dans la référence [10], à partir des données

de [5] et [6]. La figure 5 présente une comparaison de l'impact de divers composants d'un onduleur sur différents indicateurs normalisés. Il a été également montré que pour le convertisseur étudié et pour la phase de fabrication, trois « Hot spots » ont été identifiés correspondant aux composants ayant les plus importants impacts : module de puissance, boîtier aluminium/refroidisseur, capacité du bus DC. A l'inverse, les cartes PCB et les drivers ont des impacts mineurs.

La référence [7] présente une ACV d'un convertisseur avec un focus sur le coût du recyclage. [11] chiffre l'empreinte carbone des matériaux, des processus de fabrication, et du recyclage d'un convertisseur DC/DC faible puissance.

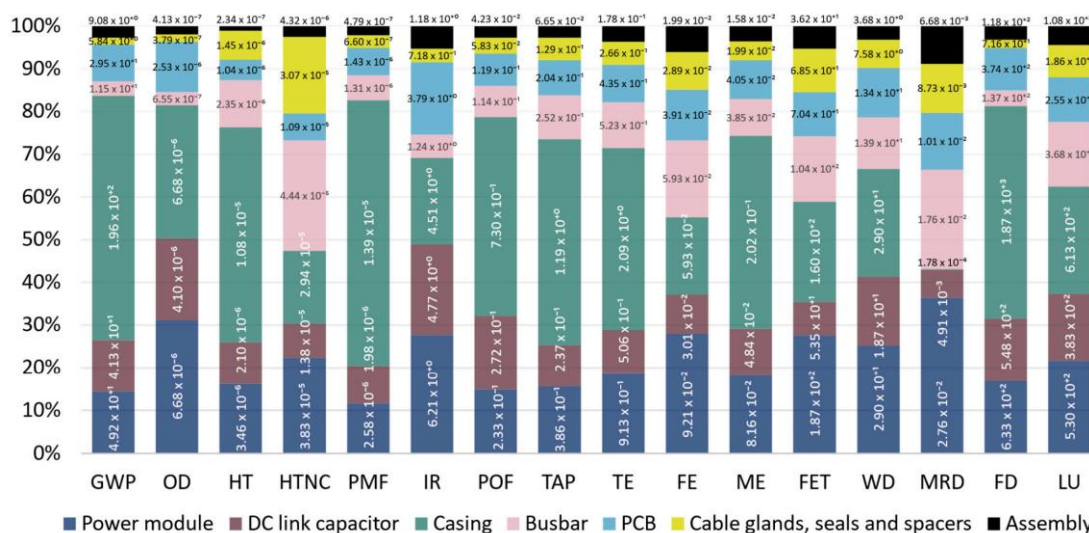


Figure 5 : Résultat d'une ACV d'un onduleur 150kW : impact de différents composants sur plusieurs indicateurs [10]

Certains travaux de la littérature se concentrent sur l'ACV d'une partie du convertisseur. C'est le cas de la référence [12] qui compare les procédés de brasure et de frittage pour les modules de puissance, en utilisant Open-LCA et Recipe. [13] présente une vue très pragmatique de l'ACV d'un module d'induction culinaire, et en particulier de sa carte électronique. La référence [14] présente un modèle assez complet pour les technologies de refroidissement en électronique de puissance. Dans [15], les auteurs étudient l'impact des polluants dans l'industrie de recyclage des condensateurs.

La référence [16] introduit la notion de « energy pay back time » (temps d'utilisation compensant l'énergie pour la fabrication) pour les systèmes d'électronique de puissance (similaire à ce qui est fait pour les sources d'énergie renouvelable) afin de mettre en valeur les gains d'énergie obtenus grâce aux systèmes d'électronique de puissance. Deux applications sont présentées sur des convertisseurs 2.2kW et 11kW.

Réaliser un bilan des impacts environnementaux d'un produit n'est pas suffisant. Il est nécessaire de lui associer une analyse de ses impacts. Cela permet de guider une démarche d'éco-conception et/ou d'éco-dimensionnement. A cette étape, il est important d'éviter les « effets rebonds » ou de « transfert d'impacts ». Par exemple, si la phase d'usage présente un impact dominant (pertes importantes), le réflexe est de réduire les pertes. Cependant, cette réduction engendrera généralement un surdimensionnement du composant et donc une dominance de la phase de fabrication. Un compromis devra donc être trouvé, qui passe par une approche globale multifactorielle.

En conclusion, il existe des outils et des méthodes permettant l'analyse de l'impact des convertisseurs sur l'environnement. Cependant, les données nécessaires en entrée de ces outils, concernant les matériaux et les processus, sont insuffisamment référencées, ce qui ne permet pas

une analyse fiable. Certains travaux de recherche, principalement européens, ont été identifiés ci-dessus, et ouvrent la voie au développement des ACV en électronique de puissance. Pour aller plus loin, l'effort doit maintenant se concentrer sur l'établissement de BdD fiables, exhaustives et adaptées au cas des convertisseurs de puissance. Au-delà des matériaux, la BdD doit prendre en compte le plus fidèlement possible les flux entrants et sortants des process de fabrication et de déconstruction.

## 4.2 - Axe Indicateurs

### 4.2.1 - Notion d'indicateur

Un indicateur est un outil d'évaluation et d'aide à la décision conçu à partir d'un ensemble d'éléments mesurables ou appréciables et qui permet de décrire les performances, l'état ou les impacts d'un système de manière chiffrée. En EP, le rendement ( $\eta = P_e/P_s$ ) ou encore les densités de puissance en W/l ou W/kg d'un convertisseur en sont des exemples. Pour appréhender la soutenabilité en électronique de puissance, de nouveaux indicateurs sont nécessaires. Certains sont normalisés et génériques, ce sont les indicateurs d'impact environnementaux. D'autres, plus spécifiques à chaque domaine, accompagnent les processus d'évaluation et de conception. Ils sont définis ci-après comme des indicateurs technologiques de soutenabilité.

### 4.2.2 - Les indicateurs environnementaux : état de l'art et analyses

Les indicateurs d'impacts environnementaux sont notamment utilisés dans la méthode d'Analyse sur Cycle de Vie (ACV). Cette méthode permet d'évaluer les impacts sur ces indicateurs d'un système/produit tout au long de son cycle de vie. Il existe une multitude d'indicateurs et à plusieurs niveaux, comme le montre la Fig. 6. En pratique, les flux élémentaires identifiés lors de l'inventaire du cycle de vie (ICV) permettent d'évaluer les impacts sur des catégories d'impacts dont certaines sont citées sur la Fig. 6. Celles-ci peuvent être agrégées pour définir des catégories de dommages, qui sont alors en nombre réduit. De la même manière, ces catégories de dommages peuvent être agrégées pour faire ressortir un indicateur score unique. Plus les indicateurs environnementaux sont agrégés, plus la communication est facile, et la compréhension, du point de vue des différents acteurs (fabricant, utilisateur), rapide. En contrepartie, le fait d'agréger ces indicateurs implique nécessairement une perte d'information sur la réalité physique des impacts environnementaux du produit/système étudié.

Considérer la diversité des indicateurs environnementaux assure une prise en compte globale des impacts. Inversement, lorsque seuls certains impacts sont pris en compte, par exemple les émissions de CO<sub>2</sub>, des effets rebonds ou de transfert d'impacts sont possibles. Ils se traduisent par la diminution de l'effet sur une catégorie d'impact donnée au détriment de l'augmentation de l'effet sur une autre catégorie d'impact ou d'autres effets nocifs sur l'impact environnemental du produit, ce qui n'est ni souhaitable, ni visible dans le cas de l'utilisation d'un score unique ou d'un nombre limité d'indicateurs. Il existe également des difficultés d'interprétation vis-à-vis de la pondération associée à l'agrégation de plusieurs indicateurs vers un score unique. En ce sens, ces pondérations sont sujettes à des recommandations européennes ajustées chaque année et qui peuvent également dépendre des applications étudiées [17].

Les transferts d'impacts ou effets rebonds ne sont pas seulement liés à la prise en compte de trop peu d'indicateurs. Cela peut également être lié à l'absence d'approche traitant de l'ensemble du cycle de vie. En effet, si on évalue les impacts environnementaux d'un produit/système sur une partie limitée du cycle de vie, les impacts peuvent être réduits sur les phases considérées mais importants sur les phases non considérées, impliquant potentiellement sur l'ensemble du cycle, une augmentation des impacts environnementaux. Ce manque d'approche systémique est d'ailleurs

pointé du doigt à plusieurs reprises dans la littérature [1, 18, 19] dans les études ACV sur les batteries et les panneaux photovoltaïques, bien plus nombreuses que celles en électronique de puissance.

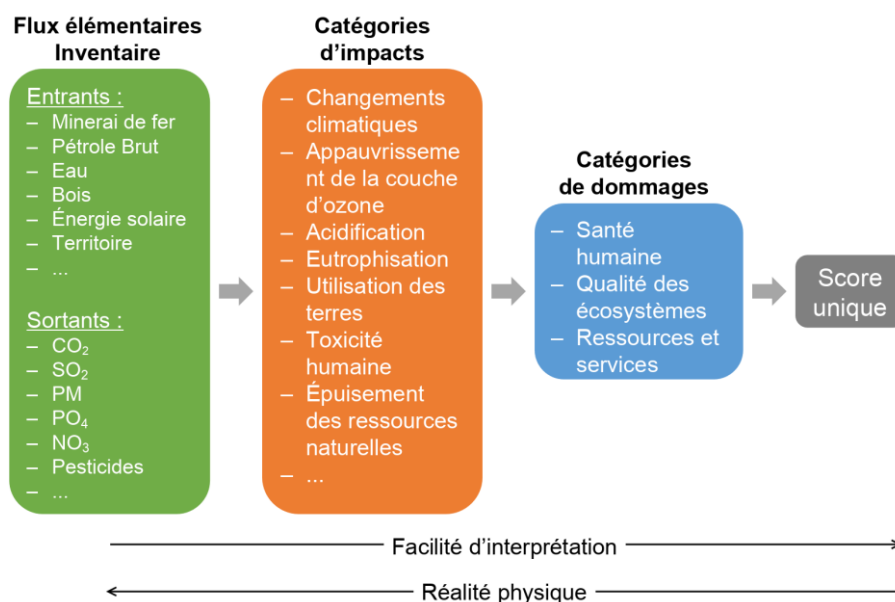


Figure 6 : Indicateurs environnementaux - Compromis entre réalité physique et facilité de communication

Dans le domaine de l'électronique de puissance, il existe plusieurs travaux évaluant les impacts environnementaux [5,6,10,20,21,22]. Notons toutefois qu'à l'exception de [10] qui traite une ACV complète sur un onduleur de traction de 150kW, la majorité des recherches s'intéresse principalement à des bilans mono-critères énergétique ou émission de CO<sub>2eq</sub>, ce qui n'est pas en adéquation avec la notion d'approche systémique.

Si ces indicateurs semblent utiles pour aller vers des convertisseurs d'électronique de puissance plus soutenables, ils ne sont toutefois pas suffisants. Aussi, le développement d'autres indicateurs est aujourd'hui nécessaire notamment au niveau de la prise de décision, aussi bien du point de vue conception (fabricant) que des utilisateurs, que ce soit pour avoir des critères de choix ou pour influencer sur la conception, l'utilisation ou la gestion de la circularité et de la fin de vie de ces convertisseurs.

#### 4.2.3 - Développement d'indicateurs technologiques pour la soutenabilité en électronique de puissance

En plus des indicateurs environnementaux génériques évoqués précédemment, il est important de compléter l'état de l'art par des indicateurs « technologiques » de soutenabilité. L'enjeu est donc ici de présenter, dans un premier temps, les indicateurs développés dans la littérature spécifiquement dans le contexte de la soutenabilité pour l'électronique de puissance et plus globalement pour le génie électrique.

##### a) Indicateurs technologiques

Le rendement en puissance est parmi les indicateurs technologiques les plus utilisés lors de la conception en électronique de puissance. Cet indicateur ne concerne que la phase d'usage du convertisseur. Il n'est donc pas suffisant pour évaluer l'impact environnemental d'un convertisseur. Un autre indicateur très populaire est la densité de puissance massique, définie comme le rapport de la puissance convertie nominale sur la masse totale du convertisseur. Cet indicateur concerne donc indirectement les quantités de matières premières utilisées lors de la phase de fabrication du convertisseur. Ces deux indicateurs ne répondent que très partiellement aux besoins d'évaluation

pour assurer la soutenabilité en EP car ils ne couvrent qu'une partie du cycle de vie et ne considèrent que quelques indicateurs environnementaux.

Plus récemment des indicateurs plus globaux ont été mis au point dans le génie électrique. Le *Rendement sur Cycle de Vie* [22] permet de prendre en compte les flux d'énergie mis en jeu dans toutes les phases de la vie du produit. Il est défini comme le rapport de l'énergie délivrée par le convertisseur au cours de son utilisation sur l'énergie totale en lien avec le produit (l'énergie absorbée à l'usage, durant la fabrication et la gestion de la fin de vie). D'autres indicateurs comme la *Valeur Résiduelle* [23], ou *l'énergie grise et les pertes pour l'éco-dimensionnement* [24] permettent aussi d'inclure l'ensemble des phases du cycle de vie. Tous ces indicateurs ont vocation à alimenter les processus de décision lors des différentes phases du produit (conception, fabrication, usage, scénario de circularité, gestion de la fin de vie).

Enfin des indicateurs spécifiques aux moyens de production de l'énergie ont aussi été mis au point comme le Carbon and Energy Payback Period [25]. Il est aussi possible de s'inspirer des indicateurs de suivi de la santé des transformateurs du réseau électrique (Health Index for Power Transformers [26]).

Un inventaire plus complet, une nomenclature et un descriptif de ces indicateurs sont donnés en libre accès sur la page du groupe de travail CEPPS [3]. Divers indicateurs pourraient voir le jour dans les prochaines années pour répondre spécifiquement aux besoins de soutenabilité dans le domaine.

## b) Quelle approche?

Si ces indicateurs technologiques représentent un enjeu fort pour la communauté d'électronique de puissance, il est important de les associer à une approche systémique (ensemble du cycle de vie) et de complémentarité avec les indicateurs environnementaux. Ils doivent servir d'aide à la conception pour aller vers des convertisseurs plus soutenables. De plus, ils pourront interagir et être complémentaires avec la mise en œuvre des indicateurs environnementaux qui servent, entre autres, à quantifier l'impact final du dispositif étudié pour valider la prise de décision. Ces points sont illustrés sur la fig. 7.

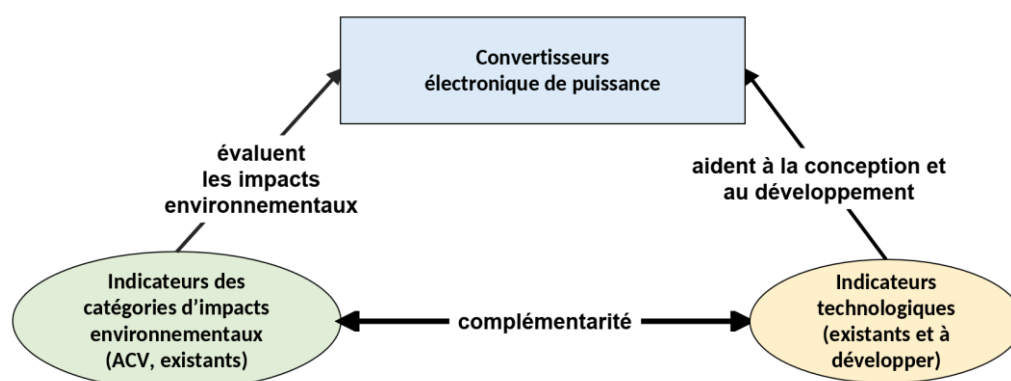


Figure 7 : Indicateurs pour aller vers la soutenabilité : approche proposée

Ces indicateurs peuvent être de multiples natures et sont en partie déjà existants, à définir ou à améliorer pour de nombreux critères de conception comme la fiabilité [27], la réparabilité [27,28], la réutilisation, la complexité, etc.

Par exemple, l'indice de réparabilité instauré en France, est un outil d'aide au choix des consommateurs, plutôt qu'un outil d'aide à la décision technique. En outre, l'usage d'une somme pondérée pour sa définition peut dans certains cas créer des biais, et appelle donc à une amélioration de cet indicateur [28].

Autre exemple, le taux de défaillance issu du domaine de la fiabilité est un indicateur existant qui est intégrable aux études de soutenabilité des convertisseurs, notamment pour estimer leur durée de vie, ou leur valeur résiduelle en fin de vie.

Enfin, les dernières recommandations européennes sur l'éco-conception [29] intègrent de plus en plus d'équipements du génie électrique (moteurs, transformateurs, etc...). Cela laisse présager l'arrivée de réglementations et/ou d'un marché autour de la circularité des équipements électriques, incluant l'électronique de puissance, renforçant ainsi l'intérêt d'aller vers des indicateurs compréhensibles et pertinents.

#### 4.2.5 - Conclusions et perspectives

Pour conclure, bien qu'un nombre croissant de travaux existe autour de la soutenabilité en électronique de puissance, il est important de noter une trop faible présence d'indicateurs de référence dédiés à la soutenabilité en électronique de puissance. Leur développement et diffusion représente un enjeu fort pour la communauté.

Il est important d'adopter une démarche systémique dans la conception des indicateurs pour limiter les transferts d'impact et de les qualifier grâce aux outils de l'ACV, avant de les utiliser et de les diffuser. A plus long terme, il sera pertinent de concevoir des indicateurs davantage « orientés application », et également d'intégrer des aspects économiques et sociaux [2].

### 4.3 - Axe Circularité

L'objectif de cette section est de donner un état des lieux des travaux scientifiques menés sur l'application de la circularité en électronique de puissance.

#### 4.3.1 - Vue globale du concept de circularité

La circularité est un concept qui a pour but de minimiser la génération de déchets et de limiter la consommation de ressources en préservant autant que possible la valeur des produits et des matériaux dans un cadre économiquement viable aussi longtemps que possible [30]. Les différents niveaux de circularité peuvent être organisés selon l'approche dite « 10 R » qui hiérarchise ces niveaux en fonction de leur portée, voir Figure 8. A l'échelle matériau, la circularité consiste à valoriser les déchets comme source d'énergie Récupérable ou comme matériaux Recyclables. A l'échelle produit, la circularité concerne des produits qui peuvent être facilement désassemblés, Réutilisés, Réparés, Rénovés, Re-fabriqués, Réadaptés. A l'échelle globale, la circularité implique des stratégies comme le Refus, la Remise en question et la Réduction dans le but de limiter les déchets liés aux produits développés. L'approche actuelle de la circularité en électronique est principalement basée sur des directives telles que la «Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) » qui se focalise sur le niveau matériau. Cependant, une approche plus globale impliquerait l'implémentation des principes de circularité sur toute la chaîne de la valeur [31].

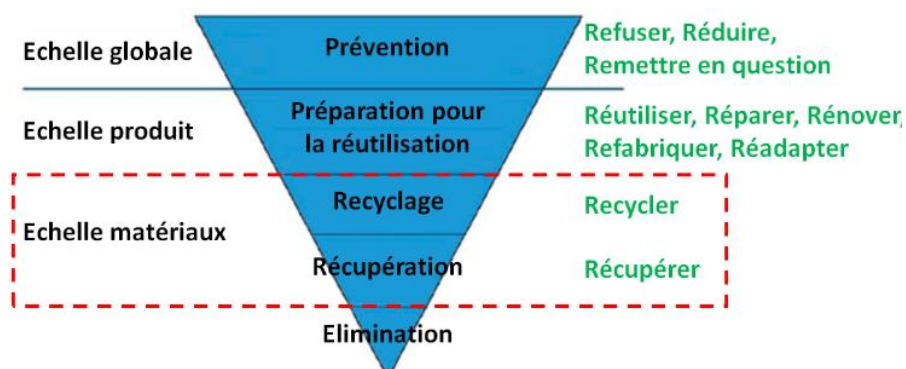


Figure 8 : Hiérarchie des déchets de l'UE (bleu), stratégies de circularité (vert) et directive WEEE de l'UE (rouge), [31,32].

### 4.3.2 - Circularité appliquée à l'électronique de puissance

La recherche bibliographique a été menée en 3 temps. Dans un premier temps, sur la base des 7000 articles collectés par l'intermédiaire de la société TKM, un premier lot d'articles a été sélectionné en se basant sur le contenu des résumés et les mots-clefs. Cela a permis d'aboutir à un ensemble de 88 articles et de 4 sous-thèmes listés ci-dessous :

- Circularité à l'échelle des matériaux

Récupération d'énergie et Recyclage des matériaux.

- Circularité des produits : étendre les durées de vie

Réparer, Rénover ou Refabriquer les produits endommagés ou obsolètes pour étendre leurs durées de fonctionnement et améliorer leurs performances.

- Circularité des produits : réemploi

Réutiliser ou Réadapter les produits ou composants fonctionnels pour une application identique ou non.

- Conception et modèle économique pour la circularité

Concevoir les produits pour la modularité et la facilité de désassemblage. Intégrer des pratiques de circularité dans les méthodologies d'écoconception. Repenser les modèles économiques pour intégrer la circularité.

Dans un second temps, un classement qualitatif relatif à la pertinence des publications (de 1 à 5) a été réalisé et uniquement 11 publications ont été classées dans les catégories 4 et 5. Dans un troisième temps, ces dernières ont été complétées par 17 articles issus de recherches supplémentaires (hors base de données obtenu par TKM). Une analyse détaillée des 28 publications finalement identifiées a été effectuée dans le travail présenté ci-dessous.

### 4.3.3 - Analyse de l'État de l'Art

#### a) Circularité à l'échelle des matériaux

Dans ce sous-thème, un faible nombre de publications a été identifié avec 1 publication traitant du recyclage des convertisseurs de puissance des véhicules électriques [7] et l'autre traitant des aspects relatifs au recyclage des polymères comprenant des poudres céramiques nickel-zinc (Ni-Zn) [33].

Dans [7], les auteurs analysent différentes stratégies de récupération des matériaux, avec ou sans étapes de démontage du convertisseur, en évaluant leur rentabilité et leur impact environnemental par ACV. Des bénéfices environnementaux sont mis en évidence, cependant les bénéfices économiques seraient pertinents que si l'ensemble du module est broyé. En effet, les filières de désassemblage sont aujourd'hui très peu développées et le surcoût engendré reste trop important. Le manque de données sur ces filières traitant de l'électronique de puissance peut être attribué à l'émergence nouvelle et rapide de ce sujet à grande échelle. Seules quelques entreprises comme Sibuet Environment®, ont été identifiées comme collectant des composants selon la directive WEEE.

#### b) Circularité des produits: étendre les durées de vie

Pour la circularité à l'échelle du produit, dans le but d'étendre les durées de vie, le nombre de publications identifiées est aussi relativement faible avec [27] qui traite de l'analyse de la fiabilité et des données de réparation des convertisseurs de puissance pour estimer les coûts de maintenance d'une centrale photovoltaïque, et [34] qui traite de l'aspect rénovation, améliorant

le système de contrôle des convertisseurs DC/DC pour résoudre les problèmes de vieillissement et d'obsolescence.

Dans [27], les auteurs se réfèrent à 2 indicateurs qui décrivent : la fiabilité des composants i.e. Mean Time to Failure (MTTF), et la réparabilité du système i.e. Mean Time to Repair (MTTR). L'indicateur MTTR est dépendant du type de défaut du composant et aux difficultés associées à son remplacement. Les convertisseurs de puissance qui ont été étudiés sont de forte puissance, 350 kW, comprenant les principaux composants suivants : ventilateur de refroidissement, disjoncteur DC, condensateur AC, carte driver et IGBT.

### **c) Circularité des produits: réemploi**

La circularité au niveau des produits pour une perspective de réemploi est davantage abordée. Les deux sujets identifiés dans la recherche bibliographique sont la réutilisation de composants passifs, [35,36], et la réadaptation d'alimentations pour PC (PC PSU). Dans ce deuxième sujet, 14 publications ont été trouvées provenant de 5 institutions académiques, les universités de Sheffield, de Toulouse, du Vietnam, de Bach Khoa et l'Institut Technologique du Cambodge. Voici quelques-uns de ces articles [37,38].

Au sujet de la réutilisation des composants passifs, le point clé est d'estimer leur durée de vie résiduelle. Comme présenté par [35], des méthodologies de prédiction de défaut existent basées sur les MIL-HDBK-217/RIAC 217 Plus, ou la norme IEC62380. Ces auteurs analysent les conditions opératoires pour estimer les durées de vie d'un condensateur électrolytique. Par rapport à la durée de vie déclarée par le fabricant, la durée de vie du composant réelle a été estimée, dans plusieurs situations de fonctionnement représentatif, être trois fois supérieure. Ainsi, ce type de composant pourrait être réutilisé au moins 1 fois, s'il était possible d'estimer correctement son histoire thermique. Dans [36], des cyclages thermiques et une analyse de prédiction des apparitions de défauts ont été réalisés sur un transformateur et un condensateur pour évaluer leur potentiel de réutilisabilité. De la même manière que [35], le résultat obtenu montre que le condensateur électrolytique pourrait être réutilisé au maximum 2 fois. Par contre, le taux de réutilisation du transformateur a été estimé à une valeur bien plus élevée i.e. de 5 à 10 fois.

Concernant la réadaptation des PC PSU, l'objectif principal de ces études est de proposer un convertisseur de puissance à faible coût dans un contexte de frugalité, notamment dans les pays en développement. Dans [39], les auteurs ont réalisé une analyse de l'impact environnemental par ACV de cette réadaptation dans un système photovoltaïque. En comparant les scénarios avec et sans réutilisation du système complet, l'impact environnemental de la réadaptation des PC PSU est marginal par rapport à la réutilisation des batteries ou des cellules solaires. A l'inverse, lors de l'usage, l'efficacité du convertisseur de puissance a la principale influence sur l'impact environnemental. Cette analyse montre l'importance des contraintes de fiabilité et d'efficacité dans les solutions de réadaptation afin de ne pas transférer l'impact environnemental d'une étape du cycle de vie vers une autre, problématique commune à la circularité des produits.

### **d) Conception et modèle économique pour la circularité**

Les études sur la circularité dans l'électronique de puissance soulignent l'importance de prendre en compte la modularité et la facilité de désassemblage dès la phase de conception. Notre revue de la littérature a permis d'identifier 5 articles [23,24,36,40,41] publiés par l'Université de Grenoble, traitant de cette problématique. Ces études visent principalement à développer des méthodologies et des indicateurs de fiabilité, de réparabilité, de réutilisabilité et de facilité de désassemblage, pour intégrer la circularité dans le processus de conception en vue de la réutilisation et du recyclage

des composants. [41] est une revue de littérature sur l'éco-conception dans le domaine de l'électronique de puissance qui contient des informations complémentaires à celles présentées ici.

Dans le même contexte, l'ACV est essentielle pour évaluer la circularité dans le processus global d'éco-conception. Cependant, comme les sous-thèmes de circularité des matériaux et des produits sont peu étudiés dans la littérature, il y a un manque d'études portant sur l'ACV incluant les aspects de circularité. En plus des références [7] et [39] présentées précédemment, une ACV du berceau à la tombe incluant des scénarios de fin de vie a été réalisée sur un transformateur planaire [24], sur des condensateurs électrolytiques en aluminium [42], sur des condensateurs céramiques multicouches et électrolytiques au tantale [43] et sur des produits électroniques de puissance électro-intensifs [44]. De plus, [12] présente une ACV dans laquelle l'utilisation de matière première secondaire, ici l'argent dans le procédé de frittage, est prise en compte.

Au-delà de la perspective de conception, les auteurs abordent également dans [40] la mise en œuvre de la circularité dans les systèmes de produits-services en considérant les modèles d'affaires interentreprises et entreprise-consommateur. En complément, l'étude plus large sur le secteur de l'industrie électrique et électronique [45] identifie sept modèles d'affaires innovants pour la circularité.

#### 4.3.4 - Bilan bibliographique de la circularité en électronique de puissance

Dans l'ensemble, le nombre d'articles collectés est relativement faible soulignant le besoin de davantage d'études dans ce domaine en électronique de puissance. Les principaux sous-thèmes traités sont la circularité des produits: réemploi et la conception pour la circularité, voir Figure 9.

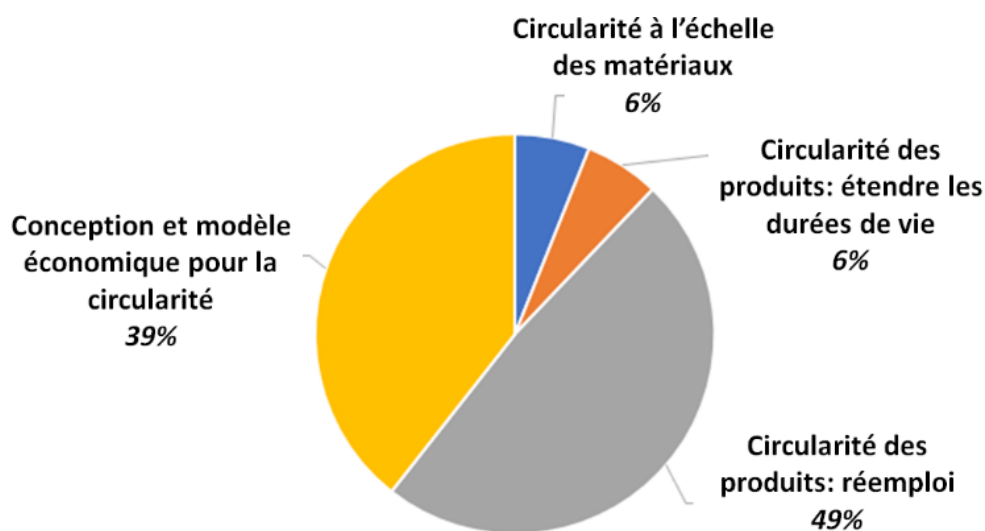


Figure 9 : Répartition des articles collectés par sous-thèmes

L'analyse de la littérature souligne plusieurs points importants : le manque d'acteurs identifiés dans les filières de désassemblage, le manque d'études autour de la réparabilité, la rénovation ou la refabrication ; les défis liés à la fiabilité des composants et au processus de démontage dans le cadre de la réparabilité et du réemploi ; l'intérêt démontré dans de nombreux articles pour la réadaptation ; l'importance d'intégrer la circularité dans les exigences d'éco-conception associée à la nécessité de l'ACV du produit de bout en bout ; le besoin global de repenser le modèle économique.

#### 4.4 - Axe Matériaux

La soutenabilité en électronique de puissance / électronique place les matériaux et les procédés en première ligne. L'enjeu est sans nul doute important, mais difficile à aborder en raison de l'enchevêtrement des procédés de fabrication et des différents matériaux qui conduisent au

système. Cette hétérogénéité est montrée dans la Fig. 10 sur un onduleur d'une alimentation sans interruption de quelques kilowatts.

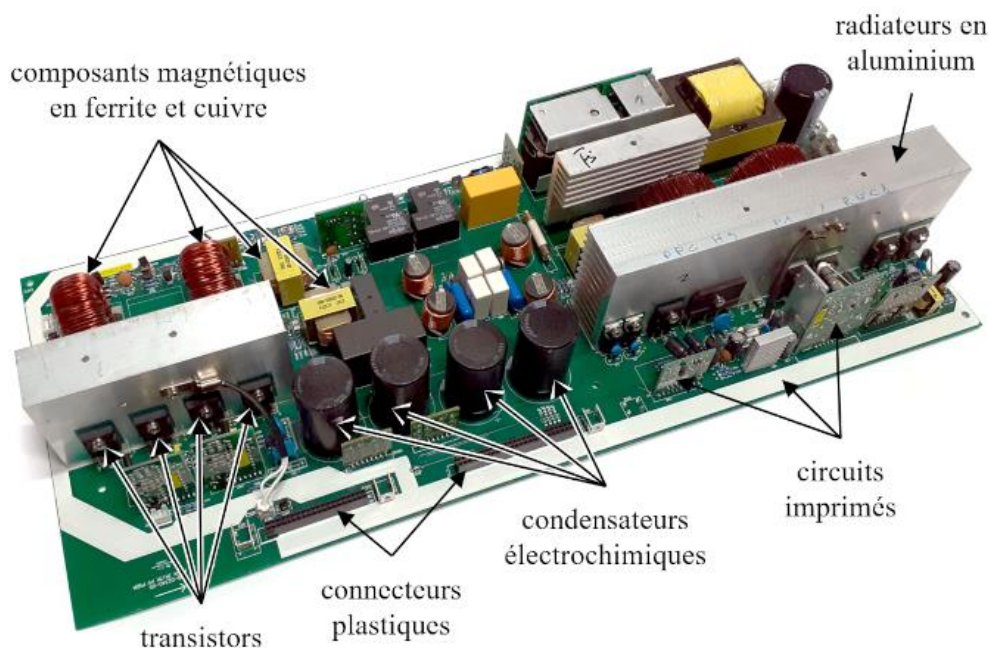


Figure 10 : Hétérogénéité des composants et procédés de fabrication d'un onduleur d'une alimentation sans interruption de quelques kilowatts

L'approche de conception tend à découpler les constituants au travers de critères simplifiés, comme un cahier des charges ou simplement des caractéristiques (résistivité électrique, thermique, résistance à l'état passant, permittivité, perméabilité, etc.). L'utilisation de brasure sans plomb va par exemple imposer une meilleure stabilité du substrat à la température (augmentation de la  $T_g$  du substrat), ou les composants à grand gap avec leur grand  $dV/dt$  vont imposer une meilleure intégration des transistors (réduction des capacités parasites) et des passifs (fréquence de découpage plus élevée). En imitant la méthodologie précédente, le questionnement de la soutenabilité s'introduit de prime abord au travers de nouveaux critères comme l'analyse sur cycle de vie (du berceau à la tombe). Cette analyse s'étendant sur la vie entière du système, soit sur l'extraction - transformation de la matière, aux méthodes d'assemblage, d'utilisations et de fin de vie, mais aussi avec des granularités très variées (matériaux, composants et systèmes). Cela ne laisse pas d'autre choix que d'avoir recours à de larges bases de données. Finalement, face à l'envergure de la question de la soutenabilité des matériaux en électronique de puissance, les chercheurs développent soit une approche (top-down), qui part du système vers les matériaux [5,6,10,21] soit sur une approche qui consiste à évaluer différents processus d'obtention ou de composition des matériaux fonctionnels (bottom-up). L'approche top-down donne une vision d'ensemble alors que la vision bottom-up montre l'étendue des choix des voies de synthèse, de composition, de substitutions, etc. Dans cette section matériaux, et en raison des différentes communautés scientifiques qui sont intervenues, nous avons fait le choix de découper l'organisation des matériaux utilisés en EP par leurs fonctions plutôt dans une approche bottom-up :

- Les matériaux magnétiques pour les inductances et les transformateurs où l'on retrouve surtout les ferrites, mais aussi les nanocristallins, les amorphes, les poudres de fer, les permalloy, etc. ;
- Les matériaux diélectriques pour le stockage de l'énergie électrique avec les condensateurs tels que les condensateurs électrolytiques, céramiques, polymères, etc. ;
- Les conducteurs, les interconnexions et les isolations via des conducteurs (Al, Cu), des joints d'assemblage de brasures (SnBi, SnAgCu, Ag, etc), des substrats (composites époxy fibre de

verre, PVDF, substrat céramique, etc) et des packagings (métaux, thermo-durcissables, thermo-plastiques, etc.) ;

- Les semi-conducteurs pour la réalisation d'interrupteurs statiques.

Les châssis, boîtiers et autres carters et les dissipateurs thermiques passifs ou actifs permettent de protéger le dispositif et de transmettre la chaleur à la source froide. Bien que étant des éléments importants de l'ACV du système, comme le montre [5] sur des systèmes de fortes puissances, ils n'ont pas été considérés dans ce travail. Chaque thème est vaste, l'objectif est de proposer une introduction au sujet en mettant l'accent sur quelques points importants et sans détailler la partie des procédés.

Les chiffres annoncés dans les sous-parties suivantes sont difficilement dissociables du contexte de l'étude tel que précisé dans les articles cités. Néanmoins, il donne un aperçu quantitatif.

#### 4.4.1 - Matériaux magnétiques : les ferrites

Les ferrites, composés d'un magnétique doux en manganèse-zinc (Mn-Zn) et nickel-zinc (Ni-Zn) sont très utilisés en EP car ces matériaux conservent de bonnes propriétés autour des fréquences de découpage utilisées. Ils restent économiques pour un développement de grand volume de production. L'article de [46] propose une analyse sur cycle de vie de différentes compositions, et de leur impact environnemental. Il montre la nécessité de connaître le taux de manganèse et de nickel, au risque d'avoir des variations importantes des résultats quant à l'impact environnemental allant de 20% à 500% en fonction de la composition. Comme ordre de grandeur, les indicateurs d'impacts sont autour de 1000 mPt et 1 kg CO<sub>2</sub>eq par kg de ferrite. Sous la méthodologie ReCiPe, la plupart des ferrites Ni-Zn ont un impact plus faible que les ferrites Mn-Zn, mais cette remarque n'est plus valide si l'on considère l'empreinte carbone.

#### 4.4.2 - Matériaux diélectriques

Trois technologies de condensateurs sont disponibles et utilisées en EP, les condensateurs électrolytiques, céramiques et polymères. Les condensateurs électrolytiques sont très utilisés pour leur large capacité à faible coût et leur encombrement réduit et les condensateurs céramiques pour leurs meilleures performances en fréquence et en température.

Zhang et al. [47,48] proposent une ACV des différents types de condensateurs électrolytiques aluminium avec des électrolytes polymères, liquides ou hybrides. Ils montrent que l'impact est principalement dû à la production de l'aluminium. Pour les hybrides, à condition qu'ils soient utilisés suffisamment longtemps, ils peuvent réduire leur impact environnemental d'un facteur 2. Typiquement, ils produisent 42.6 tCO<sub>2</sub>eq, 10.4 t équivalent pétrole et 86.1 kg équivalent NO<sub>x</sub> pour un million d'unités.

Smith et al. [43] proposent une ACV des condensateurs MLCC (multi-layer ceramic capacitor) et électrolytiques à base de tantale. Ils montrent que la transition des technologies tantales vers les MLCC présente aussi un intérêt du point de vue environnemental. Le nickel utilisé pour les électrodes internes et le cuivre pour celles externes sont les éléments qui dégradent l'ACV. L'ACV de la technologie tantale est, quant à elle, dégradée par la nécessité d'avoir une pureté élevée. Ce dernier travail illustre bien la complexité des procédés, et des additifs à prendre en compte afin d'améliorer une propriété ou une autre, qui vont avoir toute une série d'effets, par exemple l'ajout de terres rares (dysprosium ou d'holmium) pour maintenir une bonne isolation électrique sur une longue période permet d'avoir des couches plus fines qui ont une meilleure durée de vie.

Bien que les condensateurs films semblent avoir un impact faible grâce à l'utilisation de matériaux thermoplastiques, nous n'avons pas trouvé de papier sur le sujet. Néanmoins on remarquera des publications sur des condensateurs à base de matériau biosourcé [49]. Parallèlement, en fonction des technologies des condensateurs, les durées de vie sont très variables et dépendantes de la température. Dans ce cas, l'ACV, calculée pour une même énergie cumulée, peut être une voie intéressante de normalisation [48]. Aussi, le mode d'utilisation qui induit les contraintes applicatives (filtrage d'un bus DC ou circuit résonnant) doit aussi être considéré comme un facteur discriminant.

#### 4.4.3 - Interconnexion, substrat et packaging

Largement associés aux liaisons électriques internes et externes, le packaging et le substrat assurent l'interconnexion, l'isolation, le maintien mécanique et la protection des composants actifs de puissance. Comme préalable, il faut savoir que le substrat historique, composite de résine époxy renforcée par de la fibre de verre, a été optimisé pour augmenter la température de transition vitreuse ( $T_g > 150^\circ\text{C}$ ), la tenue mécanique et ses performances électriques en rapports avec les besoins applicatifs et les processus de fabrication. Il contient aussi un retardateur de flamme au brome (TBBPA) afin d'obtenir la certification L94V-0 qui assure la non propagation et l'extinction des flammes. Pour des applications plus exigeantes aux conditions électriques et thermiques, l'usage est de privilégier des substrats à base de céramique ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , AlN,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , etc) liés à des métallisations en couches épaisses, généralement en cuivre.

Les travaux de Herrmann et al. [50], bien que datant de 2001, proposent une ACV comparative du berceau à l'usage d'un époxy et d'un substrat hybride céramique ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dans le cas d'une application automobile. Il obtient un gain grâce à une réduction de sa surface sur quelques unes des 6 catégories d'impact évaluées (énergie consommée, GWP100, toxicité, etc...) avec l'utilisation d'un substrat hybride.

Plus récemment, il y a un fort intérêt pour des substrats alternatifs biosourcés et biodégradables. Kovacs et al. [51] présentent une bonne introduction sur le sujet. Ils étudient différentes alternatives de substrats avec en particulier une étude d'un époxy biosourcé, mais non biodégradable pour des applications exigeantes en température et un substrat biodégradable à base d'acétate de cellulose pour les autres applications.

Dans les matériaux biodégradables (disons compostables) l'acide poly-lactique (PLA), matériau très utilisé en fabrication additive par dépôt de filament (impression 3D), occupe une place importante dans la littérature [52]. Il existe aussi des matériaux intermédiaires où soit la matrice, soit le liant est biodégradable.

On notera aussi que l'électronique souple propose des substituts au poly(naphtalate d'éthylène) (PEN) et au poly(téréphtalate d'éthylène) (PET), avec de la cellulose chargée de nanosilicates [53]. Cependant il faut considérer que les caractéristiques de ces alternatives sont différentes des celles des standards. Par exemple une faible température de transition vitreuse va compromettre une utilisation à haute température, nécessaire avec une brasure SnAgCu supérieure à  $200^\circ\text{C}$ .

#### 4.4.4 - Matériaux semi-conducteurs

Les matériaux semi-conducteurs, utilisés ici pour fabriquer les transistors et les diodes de puissance, sont le résultat d'une combinaison de procédés complexes permettant d'aboutir à des wafers d'une grande qualité de fabrication et avec un niveau de pureté exceptionnel (99.9999%). Ces wafers sont ensuite transformés au travers de différents procédés dans des environnements contrôlés (salles blanches) qui nécessitent des ressources importantes (énergie, produits chimiques, eau pure, etc). Les semi-conducteurs pour l'électronique de puissance représentent environ 7% du

marché, mais avec une taille de gravure d'une décade supérieure à celle de la micro-électronique [54]. Aussi, si la phase d'usage des composants peut être estimée, les phases de fabrication restent difficiles à appréhender comme exposé par Andersen and al. dans le cas des cellules photovoltaïques [55]. Cette évaluation est rendue encore plus complexe en considérant la fin de vie des semi-conducteurs. La référence la plus détaillée d'une étude par une analyse sur la phase de production porte sur la filière du silicium en électronique [56]. Elle conforte l'idée que l'une des voies d'amélioration à court terme est de rendre la production des matériaux semi-conducteurs plus soutenable en optimisant les processus de production.

L'étude de la soutenabilité des composants semi-conducteurs pour l'électronique de puissance reste peu voire pas abordée dans la littérature. Conséquence que la masse cumulée des semi-conducteurs est négligeable en proportion avec celle du convertisseur [6,10], cela interroge quant à la contribution des matériaux semi-conducteurs à la soutenabilité ? La question est délicate en considérant la quantité de ressources nécessaires pour produire des matériaux à si forte valeur ajoutée. En perspective, les matériaux à grand gap tels que le carbure de silicium et le nitrure de gallium réduisent encore la masse des semi-conducteurs sans forcément considérer le bilan global des coûts et des gains sur le cycle de vie du convertisseur [57,58]. Peut-être à l'image de la microélectronique, le raisonnement s'adosse sur les fonctions par  $\text{cm}^2$  dans l'idée d'optimiser les coûts des processus de fabrication et de matière. Il en résulte une philosophie sous-jacente qui vise à réduire la taille pour améliorer la soutenabilité. Le lien avec l'ensemble des matériaux est aussi très fort puisque l'augmentation des fréquences de fonctionnement peut réduire la taille des passifs et ainsi la quantité de matière consommée par effet d'échelle, mais pas les contraintes reportées à la fonction et à son environnement (passifs, thermiques, DP...).

#### 4.4.5 - Conclusions et perspectives

L'enjeu de la soutenabilité des matériaux pour les convertisseurs est difficile à aborder en quelques paragraphes en raison de la diversité des matériaux et de leurs procédés, mais aussi de leurs liens avec le système. En allant du matériau au système et du berceau à la tombe, nous proposons de faire ressortir quelques points d'intérêts :

- La pureté des matériaux lorsqu'elle est un facteur essentiel pour l'obtention des propriétés induit un besoin de ressources et un impact environnemental importants lors de leur synthèse.
- Parce qu'une analyse est intimement liée à son utilisation, on retrouve surtout des analyses comparatives entre deux technologies (MLCC-tantale, ferrite NiZn-MnZn, Céramique/Epoxy, etc).
- Une vision transverse des procédés d'assemblage est nécessaire afin de s'assurer de la compatibilité de l'ensemble des procédés de fabrication, le respect des normes et le maintien de la durée de vie et de la fiabilité.
- Le gain énergétique sur l'usage du système versus la surconsommation à la production de convertisseurs plus efficaces s'évalue au travers de l'ACV, tout comme le choix de l'architecture de conversion, de la fréquence de découpage, etc.
- La question de la fiabilité, adossée à la durée de vie, reste aussi un point crucial pour définir la durée de vie. La défaillance d'un élément du système risque fortement de dégrader l'ACV. Par exemple, aujourd'hui, l'interconnexion pèse 10% à 30% des causes de défaillance [59], mais l'utilisation de substrat/brasure/processus alternatif devra considérer avec importance cette question.

## 4.5 - Axe Filières et Communautés

Cette dernière partie présente la vision que nous avons pu organiser de l'écosystème en place à l'intersection de l'électronique de puissance et de la soutenabilité. Elle est structurée en trois sous parties, la première présente les acteurs académiques à l'échelle nationale, à travers leur implication dans le GT CEEPS. Cela inclut les aspects recherche mais aussi les formations et moyens de formation que nous avons pu collecter dans notre enquête. La seconde partie présente une liste des conférences et journaux susceptibles de proposer des publications en lien avec la soutenabilité en EP. La dernière partie présente l'état de notre maillage à l'échelle nationale et internationale des acteurs industriels en place ou susceptibles d'être en mesure de se positionner sur la chaîne de valeur de la soutenabilité en EP. Une analyse rapide énonce les principaux secteurs qu'il faudrait approfondir ou renforcer faute d'acteurs.

### 4.5.1 - Forces en présence au sein du groupe de travail CEEPS

L'objectif de cette partie présente un état des lieux basé sur une enquête réalisée auprès des membres du GT CEEPS aussi bien sur les aspects recherches que sur les aspects enseignements. Les membres actifs du GT ainsi que leurs institutions sont listés sur le site du GT, cela représente déjà une communauté nationale riche et diversifiée. On peut également le voir en regardant les statuts des membres actifs au sein du GT Figure 11. Sur les activités de recherche des membres du GT, en dehors des activités propres à ce dernier, celles-ci sont variées et occupent une partie importante du domaine de l'EP. On peut par exemple citer les aspects de modularité, d'architecture et de conception de convertisseur d'EP, l'intégration de puissance, la conversion et la modélisation très haute fréquence, la fiabilité des systèmes d'EP, les composants actifs et passifs d'EP ou encore l'optimisation et la gestion optimisée. Certain(e)s travaillent également directement sur les aspects de circularité, d'indicateurs et/ou d'analyse sur cycle de vie. Enfin, des aspects plus orientés systèmes ou hors de l'EP sont aussi abordés : les énergies renouvelables, les systèmes de stockage de l'énergie, les machines et les réseaux électriques. Un sondage effectué (8 votants) au sein du GT a permis d'estimer le temps d'investissement alloué, en pourcentage par rapport au temps total dédié à la recherche, sur les questions liées à la soutenabilité au sein de l'EP. Ceci est illustré figure 12. Toutes les personnes ayant votées et ne menant pas d'activités de recherche sur cette activité souhaitent le faire à court terme.

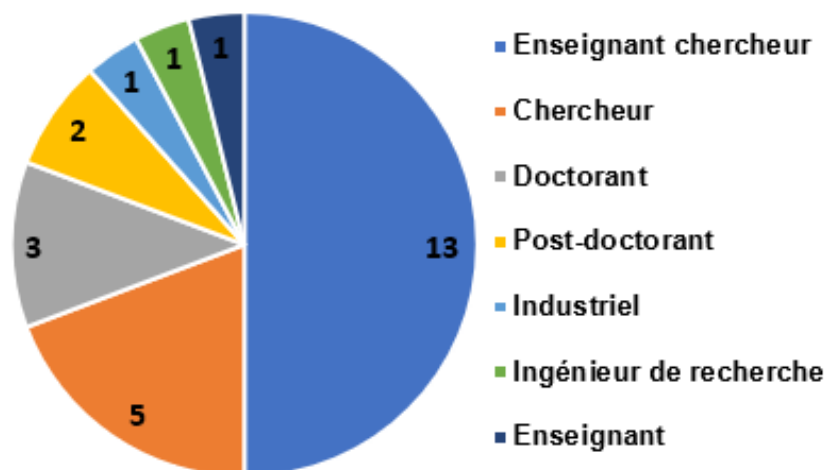


Figure 11 : Répartition des statuts au sein du GT

Sur les aspects enseignements, 7 membres votants précisent donner des enseignements autour de la soutenabilité pour le génie électrique et l'électronique de puissance variant de « quelques » heures ou l'organisation de « quelques conférences » à des volumes horaires allant de 9 à 30 heures (EQTD) pour des publics variés (I.U.T, écoles d'ingénieurs, licences et masters). S'il faudrait plus de réponses pour effectuer un état des lieux plus complet, la tendance actuelle semble tout de

même démontrer que la plupart des établissements du secondaire ne proposent pas encore de formations adaptées à ces questions mais que cela tend à se mettre de plus en plus en place. Cela implique notamment un besoin d'aller vers la formation des enseignants et enseignants chercheurs. En ce sens, sur la question de l'intérêt d'une mutualisation des outils de formation (1 = pas d'intérêts, 10 = intérêt fort), les réponses des 15 votants présentent une moyenne de 8 avec un écart type de 1,93, semblant montrer un intérêt certain. De la même manière, 13 des 15 votants considèrent ne pas ou peu maîtriser les outils d'analyse sur cycle de vie et émettent l'envie de mieux les maîtriser. L'objectif est, par la suite, d'élargir ce recensement à l'échelle nationale.

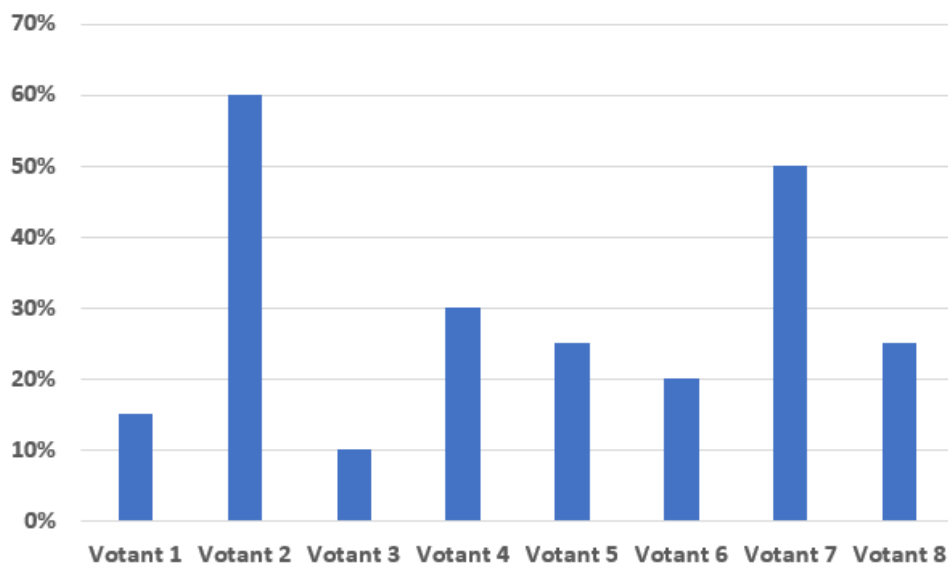


Figure 12 : Investissement relatif en recherche sur la soutenabilité en EP

#### 4.5.2 - Journaux, conférences et autres acteurs

L'état de l'art réalisé ces derniers mois par l'ensemble des membres du GT a permis de recenser les principales conférences et les principaux journaux dédiés à la thématique de la soutenabilité en électronique de puissance et, par extension, pour le génie électrique. Ce recensement étant évidemment non exhaustif, les informations associées sont reportées sur le site du GT. En plus des journaux et conférences associés à la soutenabilité en EP, ceux associés plus particulièrement à la soutenabilité (analyse sur cycle de vie, circularité, etc.) au sens général sont également répertoriés.

La soutenabilité étant un domaine de recherche à part entière, il est également important de répertorier les acteurs existant et spécialisés sur ce point, dans ou en dehors du spectre du génie électrique, nationaux ou internationaux. Pour les mêmes raisons que celles évoquées précédemment, ce recensement est également disponible sur le site du GT.

#### 4.5.3 - Outils utilisés et à disposition

Cette partie recense les principaux outils d'Analyse sur Cycle de Vie utilisés par les membres du GT ainsi que les outils de formation ou d'auto-formation existants. Si pour ce premier point, les informations sont résumées sur la figure 13, pour le second, la figure 14 propose une liste des bases de données utilisées par les répondants au sondage.

Pour les outils EIME et de l'ADEME, le logiciel d'Analyse sur Cycle de Vie est directement associé à des bases de données. Les résultats ci-dessous semblent indiquer une hétérogénéité et importante diversité des outils utilisés bien que ceux gratuits (OpenLCA, Brightway2) soient privilégiés. Sur les bases de données, Ecolnvent est majoritairement utilisé.

Il serait intéressant, afin de renforcer la communauté, de travailler avec des outils communs et qui favorisent ainsi la communication et interactions que ce soit au sein ou en dehors du GT.

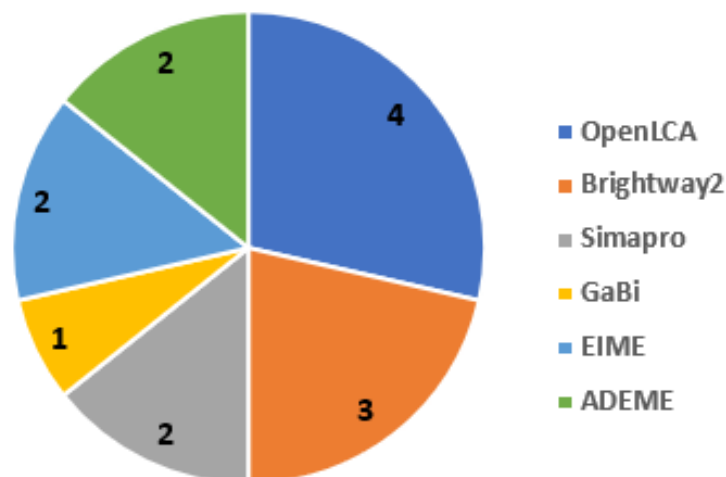


Figure 13 : Logiciels d'Analyse sur Cycle de Vie utilisés par les votants (6 votants)

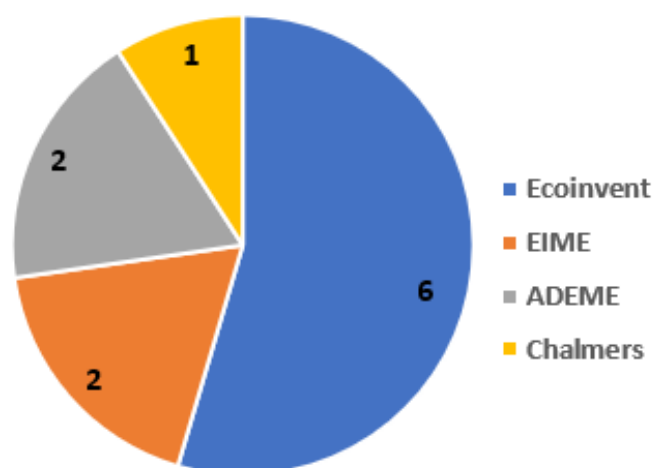


Figure 14 : Bases de données utilisées par les votants (6 votants)

#### 4.5.4 - Ecosystème autour de la soutenabilité en EP

L'état de l'art de l'écosystème pour la soutenabilité en EP reste un exercice difficile car les choses évoluent ou vont évoluer rapidement dans les prochaines années. On peut néanmoins essayer de dresser un petit état des lieux sur ce qu'il se fait déjà à différents niveaux.

Des acteurs industriels majeurs, tels que Schneider Electric, proposent dès à présent une offre de produits reconditionnés [60]. La plupart des équipementiers automobiles nous font remonter le fait que leurs clients leur demandent de concevoir et produire des dispositifs d'EP réparables. D'autres acteurs, tels que EATON pour les UPS, Alstom pour les chaînes de traction assurent un SAV pour la réparation et la maintenance de certains de leurs produits via des prestataires. Des fournisseurs de composants pour le GE et l'électronique de puissance intègrent dans leur offre des solutions de reconditionnement [61]. Elles développent également des solutions de monitoring pour mieux appréhender les besoins de maintenance. Tous ces acteurs sont de fait déjà engagés dans un processus de soutenabilité en EP à travers les offres et services originaux qu'ils proposent et ce ne sont là que quelques exemples. De la même manière que précédemment, une liste non exhaustive et mise à jour régulièrement de ces acteurs est mise à disposition sur le site du GT. On peut s'attendre à ce que davantage d'acteurs soient déjà positionnés sur des offres que l'on pourrait qualifier de soutenables.

Des groupes d'industriels sont actifs autour des normes et réglementations. Une réglementation sous la forme d'un passeport écologique est en place [62]. Plus d'information à propos des normes à l'intersection de la soutenabilité et de l'électronique de puissance disponible dans [63,64]

Avec la crise sanitaire, des ruptures d'approvisionnement en composants et circuits intégrés ont créé des opportunités pour la récupération de certains composants sur des cartes existantes, ouvrant la voie au développement de nouveaux modèles économiques.

Les acteurs du recyclage des matières premières se positionnent sur le marché de la récupération de certains métaux précieux et/ou critiques. La coordination des efforts de recyclage est menée en France par les éco-organismes qui, avec les producteurs, définissent les stratégies et les conditions de gestion de la fin de vie des produits. Pour les produits électriques, les éco-organismes à l'œuvre sont également listés sur le site du GT.

Globalement, les membres du GT pointent du doigt plusieurs besoins pour une électronique de puissance soutenable : le manque de données (procédés industriels, industries minières et matières premières), le manque d'éco-organismes, de recycleurs, l'absence d'obligation de transparence (respect de la norme, publication des données), le manque de prise de position des pouvoirs publics, l'absence d'arbitrage, etc... Un des enjeux est de développer des filières et des communautés en ce sens.

## 5 - Bilan/Perspectives des activités de recherche vers la soutenabilité en électronique de puissance

L'article a mis en évidence une activité naissante en électronique de puissance plus soutenable. Traitée en cinq parties complémentaires, le travail de recherche et d'analyse bibliographique a mis en évidence la grande diversité des sujets à traiter et l'important travail de recherche qui reste à mener pour répondre à la problématique. Si aucune institution de recherche ne ressort clairement à l'échelle internationale, on peut tout de même mentionner que l'Europe et en particulier la France semblent bien positionnées. Cette base bibliographique a vocation à aider les experts en électronique de puissance qui chercheraient à initier la prise en compte, dans le leur, de la soutenabilité. Davantage de références sont disponible sur la page du GT [3].

Le travail du GT CEPPS va à présent se concentrer sur l'analyse détaillée de l'état de l'art au regard de l'ensemble des enjeux et des verrous de la thématique pour tenter de construire une feuille de route. Les personnes intéressées par ce travail sont les bienvenues et peuvent rejoindre le GT CEPPS (voir inscription sur la page du GT).

### Références :

- [1] M. Gutsch et J. Leker, "Global warming potential of lithium-ion battery energy storage systems: A review", *Journal of Energy Storage*, vol. 52, p. 105030, août 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.105030.
- [2] K. Raworth, "A Doughnut for the Anthropocene: humanity's compass in the 21st century", *The Lancet Planetary Health*, vol. 1, no 2, p. e48 e49, mai 2017, doi: 10.1016/S2542-5196(17)30028-1
- [3] GT CEPPS, GdR SEEDS, <https://seeds.cnrs.fr/gt-convertisseurs-electronique-de-puissance-plus-soutenables/>
- [4] IPMETRIX, société TKM, France, <https://ipmetrix.io/>
- [5] Nordelöf A., Alatalo M., Söderman M. L., "A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit—part I: design and composition", *2019 International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24, 1, 78-92
- [6] Nordelöf A., "A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit—part II: manufacturing processes", *2019 International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, 24, 4, 694-711

- [7] Bulach W., Schüler D., Sellin G., Elwert T., Schmid D., Goldmann D., Buchert M., Kammer U., "Electric vehicle recycling 2020: Key component power electronics", 2018 Waste Management and Research, 2018, 36, 4, 311-320
- [8] Albir F. J. H., Hernández J. A. C., "Environmental aspects of manufacturing and disposal of power electronics equipment", 2011 EPE Journal (European Power Electronics and Drives Journal), 2011, 21, 3, 5-13
- [9] Li Z., Zhang W., He B., Xie L., Chen M., Li J., Zhao O., Wu X., "A comprehensive life cycle assessment study of innovative bifacial photovoltaic applied on building", 2022 Energy, 2022
- [10] Baudais, B.; Ben Ahmed, H.; Jodin, G.; Degrenne, N.; Lefebvre, S., "Life Cycle Assessment of a 150 kW Electronic Power Inverter", 2023, Energies 2023, 16, 2192.
- [11] Vasan A., Sood B., Pecht M., "Carbon footprinting of electronic products", 2014 Applied Energy, 2014, 136, 636-648
- [12] Braunwarth L., Amrhein S., Schreck T., Kaloudis M., "Eco-logical comparison of soldering and sintering as die-attach technologies in power electronics", 2015 Journal of Cleaner Production, 2015, 102, 408-417
- [13] Elduque D., Javierre C., Pina C., Martínez E., Jiménez E., "Life cycle assessment of a domestic induction hob: Electronic boards", 2014 Journal of Cleaner Production, 2014, 76, 74-84
- [14] Scalbi S., Masoni P., "Comparative environmental assessment of nanofluid application in refrigeration of Power Electronic Traction systems", 2015 Procedia Environmental Science, Engineering and Management, 2015, 2, 1, 93-106
- [15] Tang X., Qiao J., Chen C., Chen L., Yu C., Shen C., Chen Y., "Bacterial Communities of Polychlorinated Biphenyls Polluted Soil Around an E-waste Recycling Workshop", 2013 Soil and Sediment Contamination, 2013, 22, 5, 562-573
- [16] Popovic-Gerber J., Ferreira J. A., Van Wyk J. D., "Quantifying the value of power electronics in sustainable electrical energy systems", 2011 IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26, 12, 3534-3544
- [17] Commission Européenne, "enabling sustainable choices and ending greenwashing, 2023", 2022.
- [18] A. Picatoste, D. Justel, et J. M. F. Mendoza, "Circularity and life cycle environmental impact assessment of batteries for electric vehicles: Industrial challenges, best practices and research guidelines", 2022 Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 169, p. 112941
- [19] X. Lai et al., "Critical review of life cycle assessment of lithium-ion batteries for electric vehicles: A lifespan perspective", 2022 eTransportation, vol. 12, p. 100169
- [20] C. Zhang, Y. Zheng, J. Jing, Y. Liu et H. Huang, "A comparative LCA study on aluminum electrolytic capacitors: From liquid-state electrolyte, solid-state polymer to their hybrid", 2022 Journal of Cleaner production, vol 375, p. 134044
- [21] J. Li, C. Wang, et B. Zhang, "Life Cycle Assessment of Typical Electric Vehicle IGBT Module", 2016 Materials Science Forum, vol 847, p. 298-402
- [22] B. Multon, H. B. Ahmed, V. Debusschere, J. Aubry, C. Jaouen, et F. Barruel, "Expériences de recherche en éco-conception dans le domaine du Génie Electrique (Research experiences in ecodesign in the field of Electrical Engineering)", 2012 European Journal of Electrical Engineering, vol. 5, no 2012, p. 433
- [23] B. Rahmani, M. Rio, Y. Lembeye, et J.-C. Crebier, "Design for Reuse: residual value monitoring of power electronics' components", 2022 Procedia CIRP, vol. 109, p. 140-145
- [24] G. de Freitas Lima, B. Rahmani, M. Rio, Y. Lembeye, et J.-C. Crebier, "Eco-Dimensioning Approach for Planar Transformer in a Dual Active Bridge (DAB) Application ", 2021 Eng, vol. 2, no 4, Art. no 4, déc. 2021
- [25] H. Karan, R. C. Thomson, et G. P. Harrison, " Full life cycle assessment of two surge wave energy converters ", 2020 Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, vol. 234, no 4, p. 548-561
- [26] A. Jahromi, R. Piercy, S. Cress, J. Service, et W. Fan, " An approach to power transformer asset management using health index", 2009 IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 25, no 2, p. 20-34
- [27] Spertino, F.; Amato, A.; Casali, G.; Ciocia, A.; Malgaroli, G., "Reliability Analysis and Repair Activity for the Components of 350 kW Inverters in a Large Scale Grid-Connected Photovoltaic System", 2021 Electronics 2021, 10, 564
- [28] S. Dangal, J. Faludi, et R. Balkenende, " Design Aspects in Repairability Scoring Systems: Comparing Their Objectivity and Completeness", 2022 Sustainability, vol. 14, no 14, p. 8634

- [29] Commission européenne, "Ecodesign for sustainable product", 2022 [https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products\\_en](https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products_en)
- [30] Julian Kirchherr, Denise Reike, Marko Hekkert, "Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions", 2017 Resources, Conservation and Recycling, Volume 127, Pages 221-232
- [31] Terje Andersen and Bjorn Jaeger, "Circularity for Electric and Electronic Equipment (EEE), the Edge and Distributed Ledger (Edge&DL) Model", 2021 Sustainability 13, no. 17: 9924.
- [32] Andersen, T., "A comparative study of national variations of the European WEEE directive: Manufacturer's view", 2022 Environmental Science and Pollution Research, 29, 19920-19939
- [33] W. B. Qi and K. W. E. Cheng, "New magnetic composite based on Ni-Zn for magnetic screenings and power conversion with its recyclable and formulable features", 2017 7th International Conference on Power Electronics Systems and Applications - Smart Mobility, Power Transfer & Security (PESA), Hong Kong, China, pp. 1-5
- [34] L. Guo, M. Aqil, D. S. Zinger and J. Wang, "Design and evaluation of digital control system for power converters at Advanced Photon Source", 2014 IEEE Industry Application Society Annual Meeting, Vancouver, BC, Canada, pp. 1-5
- [35] Bhargava, Cherry & Kumar, Pardeep, "Estimation of Residual Lifetime of Electrolytic Capacitor using Analytical Techniques", 2019 International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), 8, 2015-2019
- [36] B. Rahmani, Y. Lembeye, M. Rio and J. C. Crebier, "Analysis of Passive Power Components Reuse", 2021 PCIM Europe digital days 2021, International Exhibition and Conference for Power Electronics Intelligent Motion Renewable Energy and Energy Management, pp. 1-8
- [37] S. A. Abuzed, C. -W. Tsang, M. P. Foster and D. A. Stone, "Repurposing ATX power supply for battery charging applications", 2016 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2016), Glasgow, UK, pp. 1-5
- [38] B. Kim, P. Chrin, M. Pietrzak-David and P. Maussion, "Frugal Innovation for Sustainable Rural Electrification", 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications (EPE&apos;20 ECCE Europe), Lyon, France, pp. 1-9
- [39] Bunthern Kim, Catherine Azzaro-Pantel, Maria Pietrzak-David, Pascal Maussion, "Life cycle assessment for a solar energy system based on reuse components for developing countries", 2019 Journal of Cleaner Production, Volume 208, Pages 1459-1468
- [40] Maud Rio, Khawla Khannoussi, Jean-Christophe Crebier, Yves Lembeye, "Addressing Circularity to Product Designers: Application to a Multi-Cell Power Electronics Converter", 2020, Procedia CIRP, Volume 91, Pages 134-139
- [41] Li Fang, Tugce Turkbay Romano, Thecle Alix, Jean-Christophe Crebier, Pierre Lefranc, et al, "Eco-design implementation in Power Electronics: a literature review", 2023 International Symposium on Advances Technologies in Electrical Systems (SATES 23), Arras, France
- [42] Cheng Zhang, Junfeng Jing, Liu Yun, Yu Zheng, Haihong Huang, "A cradle-to-grave life cycle assessment of high-voltage aluminum electrolytic capacitors in China", 2022 Journal of Cleaner Production, Volume 370, 133244
- [43] Lucy Smith, Taofeeq Ibn-Mohammed, S.C. Lenny Koh, Ian M. Reaney, "Life cycle assessment and environmental profile evaluations of high volumetric efficiency capacitors", 2018 Applied Energy, Volume 220, Pages 496-513
- [44] Quintana-Pedraza, G.A.; Vieira-Agudelo, S.C.; Muñoz-Galeano, "A Cradle-to-Grave Multi-Pronged Methodology to Obtain the Carbon Footprint of Electro-Intensive Power Electronic Products", 2019 Energies 2019, 12, 3347
- [45] Suppipat, S., Hu, A.H., "A scoping review of design for circularity in the electrical and electronics industry", 2022 Resources, Conservation & Recycling Advances, Volume 13, 200064
- [46] Patricia Gómez, Daniel Elduque, Carmelo Pina, Carlos Javierre, "Influence of the Composition on the Environmental Impact of Soft Ferrites", 2018 Materials. 2018; 11(10):1789
- [47] Y. Zhang, F. Udrea, et H. Wang, "Multidimensional device architectures for efficient power electronics", 2022, Nat Electron, vol. 5, no 11, Art. no 11

- [48] C. Zhang, Y. Zheng, H. Huang, Z. Liu, et J. Jing, "Environmental impact assessment of aluminum electrolytic capacitors in a product family from the manufacturer's perspective", 2023 Int J Life Cycle Assess, vol. 28, no 1, p. 80-94
- [49] Florian Le Goupil, Victor Salvado, Valère Rothan, Thomas Vidil, Guillaume Fleury, Henri Cramail, Etienne Grau, "Bio-Based Poly(hydroxy urethane)s for Efficient Organic High-Power Energy Storage", 2023 J. Am. Chem. Soc. 2023, 145, 8, 4583-4588
- [50] C. Herrmann, J. Gediga, et N. Warburg, "Eco-comparison between ceramic and epoxy based populated PWBs", 2001 Proceedings of the 2001 IEEE International Symposium on Electronics and the Environment. 2001 IEEE ISEE (Cat. No.01CH37190), mai 2001, p. 303-308
- [51] B. Kovács, A. Géczy, G. Horváth, I. Hajdu, et L. Gál, "Advances in Producing Functional Circuits on Biodegradable PCB", 2016 Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science, vol. 60, no 4, Art. no 4
- [52] A. Geczy et al., "Novel PLA/Flax Based Biodegradable Printed Circuit Boards", in 2022 45th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Vienna, Austria: IEEE, mai 2022, p. 1-6. doi: 10.1109/ISSE54558.2022.9812827.
- [53] F. B. Kadumudi et al., "Flexible and Green Electronics Manufactured by Origami Folding of Nanosilicate-Reinforced Cellulose Paper", ACS Appl. Mater. Interfaces, vol. 12, no 42, p. 48027-48039, oct. 2020, doi: 10.1021/acami.0c15326.
- [54] Research and Markets, "Power Semiconductor Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2022-2027", 2022 <https://www.researchandmarkets.com/reports/5578114/power-semiconductor-market-global-industry>
- [55] O. Andersen, J. Hille, G. Gilpin, et A. S. G. Andrae, "Life Cycle Assessment of electronics", 2014, Conference on Technologies for Sustainability (SusTech), juill. 2014, p. 22-29
- [56] T. Pirson, T. P. Delhay, A. G. Pip, G. Le Brun, J.-P. Raskin, et D. Bol, "The Environmental Footprint of IC Production: Review, Analysis, and Lessons From Historical Trends", 2023 IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, vol. 36, no 1, p. 56-67
- [57] M. Cacciato, F. Scrimizzi, A. Palermo, F. Gennaro and D. Nardo, "Power Devices Comparison in Synchronous Half Bridge Topology", 2018 20th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'18 ECCE Europe), Riga, Latvia, 2018, pp. P.1-P.10
- [58] F. C. Lee, S. Wang and Q. Li, "Next Generation of Power Supplies—Design for Manufacturability", in IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 9, no. 6, pp. 6462-6475, Dec. 2021, doi: 10.1109/JESTPE.2020.3002857
- [59] H. Wang, M. Liserre, et F. Blaabjerg, "Toward Reliable Power Electronics: Challenges, Design Tools, and Opportunities", IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 7, no 2, p. 17-26, juin 2013, doi: 10.1109/MIE.2013.2252958.
- [60] Site internet de Schneider Electric, <https://www.se.com/fr/fr/work/campaign/local/circular-economy-label.jsp>
- [61] Gabriel Feltgen, Présentation GT CEPPS, "Etat des lieux de la circularité des UPS chez EATON en 2022", 2022, <https://seeds.cnrs.fr/gt-convertisseurs-electronique-de-puissance-plus-soutenables/>
- [62] EN 50693, "Product category rules for life cycle assessments of electronic and electrical products and systems", 2019, Norme CENELEC
- [63] L. Fang, T. Turkbay Romano, M. Rio, J. Melot, J.-C. Crébier, "L'apport des normes et de la réglementation pour la soutenabilité en électronique de puissance", 2023 Symposium de Génie Electrique, Lille, France
- [64] Julien Melot, Présentation GT CEPPS, "Ecodesign Standardization Map", 2022 <https://seeds.cnrs.fr/gt-convertisseurs-electronique-de-puissance-plus-soutenables/>

# Formation immersive : un levier efficace pour comprendre les impacts environnementaux ?

<sup>1</sup> Univ Rennes, ENS Rennes, CNRS, Institut de Physique de Rennes (IPR UMR 6251),

<sup>2</sup> Univ Rennes, ENS Rennes, Centre de Recherche sur l'Éducation les Apprentissages et la Didactique (CREAD EA3875),

<sup>3</sup> Univ Rennes, ENS Rennes, SUNI

*Cette ressource fait partie du N° 114 de La Revue 3EI du 1<sup>er</sup> trimestre 2025.*

Avec les préoccupations environnementales croissantes, les formations du supérieur incluent de plus en plus des enseignements sur l'écoconception. Ces formations doivent dépasser les approches traditionnelles pour aborder les impacts environnementaux de manière transdisciplinaire. Les technologies immersives telles que la réalité virtuelle permettent aux étudiants d'« entrer » dans des environnements simulés. Ces outils se révèlent plus engageants et efficaces que les méthodes classiques, bien qu'ils posent des défis (coût, impact environnemental, perception « jeu »).

L'article teste le potentiel de la réalité virtuelle pour sensibiliser et enseigner des sujets complexes comme les impacts environnementaux. Trois groupes d'étudiants ont été exposés à des supports différents (vidéo explicative, jeu interactif sur ordinateur, et immersion en réalité virtuelle) pour apprendre l'eutrophisation, un phénomène complexe lié aux écosystèmes aquatiques générant des impacts environnementaux. L'apprentissage et le ressenti ont été évalués via questionnaires et entretiens. Le groupe ayant travaillé grâce à la réalité virtuelle présente des résultats et ressentis les plus positifs, notamment grâce à l'immersion. Bien que les trois groupes aient acquis des connaissances, la réalité virtuelle s'est avérée plus efficace pour comprendre la chaîne de cause à effet. L'immersion accroît l'implication et l'apprentissage, mais l'échantillon limité nécessite des études complémentaires et un déploiement de ces expérimentations à d'autres formations et impacts environnementaux.

## 1 - Contexte

### 1.1 - Contexte des transitions environnementales

Les considérations environnementales prennent une place grandissante dans la conception de systèmes industriels. Certains consommateurs sont en effet de plus en plus attentifs à ce que l'impact sur l'environnement du produit qu'ils achètent soit le plus faible possible. Dans plusieurs secteurs (construction, chimie par exemple), le législateur impose des normes visant à réduire cet impact. Ainsi, la réglementation RE2020 impose aux bâtiments construits à partir de 2022 des normes sur la consommation énergétique, mais aussi sur le bilan carbone des matériaux et équipements employés.

Si beaucoup d'acteurs industriels se limitent aux seuls aspects liés à l'énergie ou aux émissions de CO<sub>2</sub>, une analyse multicritère des impacts environnementaux est indispensable pour éviter que la réduction d'un impact induise une augmentation d'un autre (transfert d'impact). Il faut alors

considérer tous les rejets et consommations liés à chacune des phases du cycle de vie des systèmes (extraction des matières premières, fabrication, utilisation, fin de vie). Le seul outil standardisé à ce jour pour mener ce genre d'analyse est l'analyse de cycle de vie [1][2].

## 1.2 - Formations tournées vers l'écoconception

Conscientes de l'importance grandissante de ces enjeux, les universités et écoles d'ingénieurs prennent de plus en plus en compte ces questions pour construire leur offre de formation, ce qui constitue pour le corps enseignant, des défis pédagogiques nouveaux.

Selon une étude du ministère de la Transition écologique et de la Cohésion des territoires [3], à la rentrée 2019-2020, plus de 200 diplômes « environnementaux » sont recensés dans l'appareil de formation initiale. Ils représentent 12 % de l'offre de formation initiale et 8,5 % des effectifs en dernière année (soit près de 110 000 jeunes inscrits). En 2008, ces proportions étaient seulement de 10 % et 5 %. Entre 2008 et 2019, le nombre d'étudiants inscrits dans des formations liées à l'environnement a augmenté de 60 %, tandis que, sur la même période, les effectifs dans les autres disciplines ont diminué de 12 %.

En outre, l'environnement est de plus en plus pris en compte par les étudiants. En effet, selon une enquête de The Shift project [4], 59 % des élèves et 57 % des diplômés de grandes écoles placent l'environnement en première position des causes pour lesquelles ils auraient le plus envie de travailler, devant l'éducation et la santé.

Les formations doivent donc se doter de stratégies pédagogiques nouvelles adaptées à l'apprentissage des éléments clés de l'écoconception, tels que la compréhension des impacts environnementaux.

## 1.3 - La formation immersive pour favoriser l'apprentissage

La réalité virtuelle (VR ou RV) est une technologie qui permet à une personne de se plonger dans un environnement numérique 3D simulé. La réalité augmentée (AR ou RA) est une technologie qui superpose des éléments virtuels, tels que des images, des vidéos ou des informations sur le monde réel. Dans le cas de la virtualité augmentée (AV ou VA), les systèmes considérés visent à rendre l'interaction plus réaliste, en l'associant à la manipulation d'objets du monde réel, comme des cubes, pour modifier des objets numériques tels que des fichiers. La réalité mixte (MR ou RM), également appelée réalité hybride ou combinée, est une technologie qui combine des éléments de la réalité virtuelle et de la réalité augmentée pour créer un environnement dans lequel des objets virtuels peuvent interagir avec des objets réels. La figure 1 positionne ces différentes définitions à la frontière du réel et du virtuel.

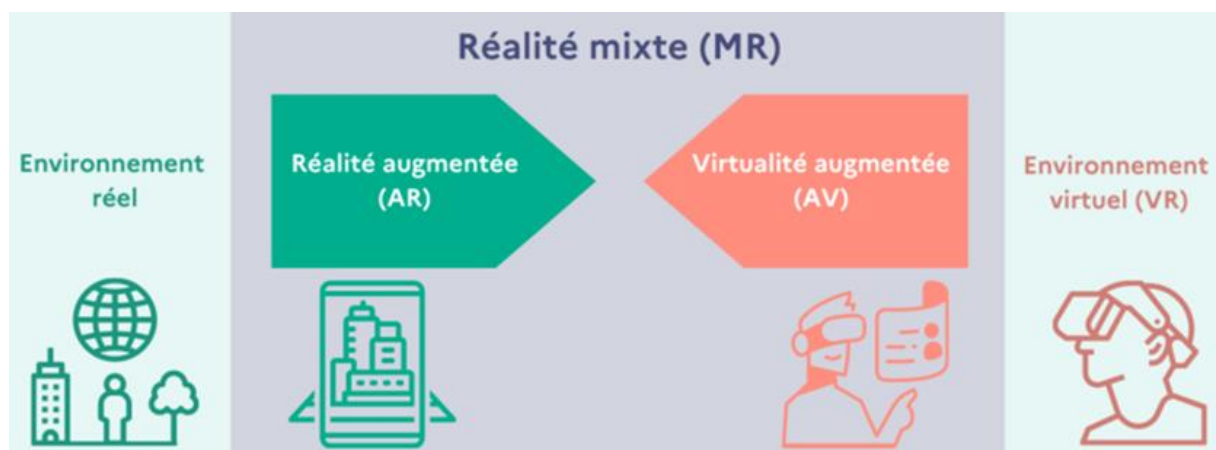


Figure 1 : Continuum réel - virtuel (adapté de DRANE - Académie de Toulouse)

L'apprentissage immersif, qu'il soit en RV, RA, VA ou RM, permet de plonger les étudiants dans des environnements propices à l'expérimentation de nouveaux concepts. La formation immersive, bien que relativement nouvelle, offre de nombreux avantages comparativement aux méthodes traditionnelles [5]. Tout d'abord, la formation immersive permet une expérience d'apprentissage plus réaliste et plus engageante. Elle offre aux apprenants la possibilité de s'immerger dans des environnements virtuels simulés, leur permettant de se familiariser avec les compétences et les procédures nécessaires à leur travail de manière pratique. Un rapport public de PWC sur l'utilisation de la RV sur les formations montre [6] que l'on retient jusqu'à 70 % mieux une formation en RV que suivie lors d'un cours magistral. De plus on estime que le temps nécessaire pour terminer une formation est de 15 min en RV contre 120 min en enseignement classique. Les apprenants peuvent également interagir avec différents éléments, résoudre des problèmes et découvrir des situations qui seraient difficiles ou dangereuses à reproduire dans un environnement réel. Cela peut aider à stimuler leur motivation et leur engagement, améliorant ainsi leur mémorisation et leur apprentissage.

#### 1.4 - Des freins à l'adoption des technologies immersives

L'adoption des technologies immersives rencontre toutefois un certain nombre de problématiques clés auxquelles il convient d'apporter des réponses afin d'augmenter leur diffusion dans des applications pédagogiques :

- Une connotation « jeux vidéo » : L'un des problèmes les plus importants entourant la RV dans la salle de classe est que de nombreuses personnes considèrent cette technologie comme une plateforme réservée aux jeux. Ils peuvent penser que les élèves n'apprendront pas grand-chose et seront plutôt distraits par les graphismes ou le gameplay ;
- Un manque de contenu : Le manque de contenu en RV éducative de qualité est un autre frein important. Il est crucial que le contenu soit à la fois éducatif et intéressant pour que les élèves soient motivés à utiliser la technologie ;
- Le coût : L'adoption de salles de classes virtuelles peut encore rester limitée en raison d'un obstacle majeur : le coût. Gérer un budget limité pour une formation peut être un défi en particulier lorsqu'il n'y a pas de place, pour les dépenses supplémentaires liées à l'acquisition de nouveaux dispositifs. Le coût de développement des contenus peut également être rédhibitoire, surtout si l'on veut atteindre la qualité graphique auxquels les étudiants sont habitués à travers les jeux vidéo ;
- L'impact environnemental du numérique : L'extraction des matières premières pour la construction des appareils a un impact considérable, tout comme les procédés de fabrication (dans des pays où l'électricité provient de sources fossiles tels que le charbon), le transport (qui peut représenter près des trois quarts des gaz à effet de serre produit par un appareil électronique sur son cycle de vie) et la fin de vie (car moins de la moitié des déchets électroniques et électriques sont effectivement recyclés dans l'UE). Le fonctionnement des appareils nécessite généralement des ordinateurs puissants qui demandent beaucoup d'énergie pendant toutes les phases de calibration, de tests et d'utilisation. Cette question de l'impact environnemental du numérique est encore plus critique pour des outils de formation visant l'éducation aux transitions environnementales.

## 2 - Problématique

### 2.1 - Etat des lieux des initiatives des formations immersives en lien avec les impacts environnementaux

La plupart des stratégies pédagogiques opèrent à une réduction de la complexité du problème, le plus souvent en isolant le phénomène à étudier de son environnement. Évidemment, quand on traite de questions environnementales, ces stratégies deviennent inopérantes, par l'approche spatio-temporellement étendue à l'échelle globale nécessaire pour comprendre les impacts environnementaux. Il est également nécessaire de renoncer au découpage strictement disciplinaire des matières et aborder les problématiques sous un angle transdisciplinaire.

Selon les travaux de Mireille Bétrancourt [7] [8], la présentation de contenus sous une forme animée permettrait de mieux transmettre des informations relatives au caractère dynamique d'un système, grâce au mouvement ou aux changements d'état des éléments. Les animations joueraient en quelque sorte le rôle d'une « prothèse cognitive » qui limiterait les exigences de traitement de l'information spatiale et dynamique par rapport à des images statiques [9].

Elles permettraient également de mieux comprendre la chaîne causale qui sous-tend la dynamique du système. Leur utilisation peut donc être une solution envisageable pour faciliter la prise en compte de causes ou d'effets qui relèvent de champs disciplinaires qui sont éloignés de la spécialité des étudiants auxquels on s'adresse et pour lesquels ceux-ci ne disposent pas des automatismes nécessaires pour traiter efficacement l'information.

Parmi ces outils on trouve la réalité virtuelle, prometteuse pour des problématiques d'apprentissage et de sensibilisation dans différents domaines scientifiques [10] [11]. Nous avons relevé ci-dessous quelques initiatives d'utilisation des dispositifs immersifs pour la sensibilisation aux impacts environnementaux :

- XR impact et son projet Be Earth : XR impact est une organisation à but non lucratif suédoise qui utilise la réalité mixte pour inspirer une action mondiale vers les objectifs de développement durable des Nations Unies. Be Earth est une application de réalité virtuelle dans laquelle les participants sont plongés dans des environnements qui illustrent les défis et les solutions liés à des problématiques globales, comme le changement climatique, la perte de biodiversité ou les inégalités sociales. L'idée est de rendre ces enjeux plus tangibles et émotionnellement impactants pour inciter les individus et les décideurs à agir de manière concrète ;
- Une application du New York Times dont l'idée principale est de visualiser les niveaux de pollution atmosphérique dans les différentes régions du monde en utilisant des technologies immersives. La pollution de l'air, bien qu'elle soit un problème grave, est souvent imperceptible à l'œil nu. Grâce à la réalité augmentée, le New York Times permet aux lecteurs de « voir l'invisible » en superposant des représentations des particules fines et d'autres polluants sur des environnements familiers ou des paysages urbains ;
- Below the Surface est une initiative de l'association environnementale Sea Shepherd, reconnue pour sa défense des océans et de la biodiversité marine. Ce projet a été conçu pour sensibiliser le grand public aux menaces invisibles qui pèsent sur les écosystèmes marins en mettant en lumière les dangers qui se cachent sous la surface des océans. Des technologies visuelles et immersives sont utilisées pour diffuser des images saisissantes, des vidéos sous-marines et pour permettre aux spectateurs de voir directement les effets de ces menaces sous l'eau. Ces représentations visuelles fortes aident à connecter émotionnellement les gens à l'ampleur des problèmes.

- Le programme VR for Impact a été lancé par HTC Vive en 2017 dans le cadre de son engagement à utiliser la réalité virtuelle comme un outil puissant pour favoriser un changement positif dans le monde. Ce programme est centré sur la création, le soutien et le financement de projets VR qui visent à sensibiliser et à résoudre des problèmes sociaux, environnementaux et humanitaires. Par exemple, l'un des projets soutenus, Project Tree est une expérience immersive qui permet aux utilisateurs de devenir un arbre dans une forêt tropicale et de ressentir les effets de la déforestation, sensibilisant ainsi au changement climatique et à la perte de biodiversité.

Si des initiatives utilisant des dispositifs immersifs peuvent être plébiscitées comme outil support à la formation, il n'existe pas à ce jour, à notre connaissance, de dispositif de RV utilisé en milieu universitaire pour l'apprentissage de l'écoconception ou la formation aux enjeux des impacts environnementaux. Avec la montée en puissance des questions environnementales dans les formations et l'arrivée à maturité des dispositifs immersifs, nous avons ainsi voulu tester l'apport d'un dispositif RV pour la compréhension des phénomènes de cause à effet engendrant un impact environnemental.

## 2.2 - Question de recherche

Pour comprendre l'ensemble des liens de cause à effet qui vont des choix faits lors de la conception d'un système à son impact sur l'environnement, il n'est plus possible de faire l'économie d'un apprentissage de la complexité. En effet, les démarches d'écoconception basées sur des analyses de cycle de vie vont engendrer des réflexions multicritères combinant les évaluations technico-économiques traditionnelles avec des évaluations d'impacts environnementaux souvent difficiles à appréhender. Une acculturation aux sciences environnementales et une meilleure connaissance des phénomènes aboutissant à des impacts environnementaux sont désormais nécessaires lors d'apprentissages en sciences industrielles. Dans cet article, on se propose de questionner si les dispositifs de formation immersifs sont de bons outils pour favoriser l'acquisition de connaissances d'apprenants sur les liens de cause à effet engendrant des impacts environnementaux.

## 3 - Méthodologie

L'expérimentation a été réalisée avec les étudiants du département de mécatronique de l'École normale supérieure de Rennes de niveau L3. Elle a été réalisée dans le cadre du premier cours du module relatif à l'écoconception et à l'analyse de cycle de vie.

Nous avons choisi de traiter au moyen d'animations les questions liées à un impact environnemental en particulier, l'eutrophisation, qui fait, pour l'essentiel, intervenir des mécanismes propres aux sciences du vivant, débordant ainsi largement du champ disciplinaire des sciences industrielles auquel les étudiants sont habitués. L'eutrophisation des milieux aquatiques est un déséquilibre du milieu provoqué par l'augmentation de la concentration d'azote et de phosphore dans le milieu. Elle est caractérisée par une croissance excessive des plantes et des algues due à la forte disponibilité des nutriments. Les algues qui se développent grâce à ces substances nutritives absorbent de grandes quantités de dioxygène. Leur prolifération provoque l'appauvrissement, puis la mort de l'écosystème aquatique présent : il ne bénéficie plus du dioxygène nécessaire pour vivre, ce phénomène est appelé « asphyxie des écosystèmes aquatiques ». Les savoirs explorés lors de la séance tournent autour de la chaîne de cause à effet du phénomène.

Le protocole est le suivant : trois groupes de 5 à 6 apprenants sont créés, chacun rattaché à une manière différente d'introduire la même animation (Figure 2) dans le milieu avec lequel ils sont amenés à interagir.

### Groupe G1 :

Vidéo explicative de la scène et des interactions entre les éléments (poissons, eau, algues) impliqués dans la chaîne de cause à effet de l'impact.

### Groupe G2 :

Prise en main sur ordinateur dans une application de type « jeu », où les étudiants disposent de l'image numérique de la scène et peuvent s'y déplacer.

### Groupe G3 :

Exploration immersive d'une scène au moyen d'un système de réalité virtuelle, grâce à un casque de VR et des dispositifs d'interaction, les étudiants sont immergés dans la scène.

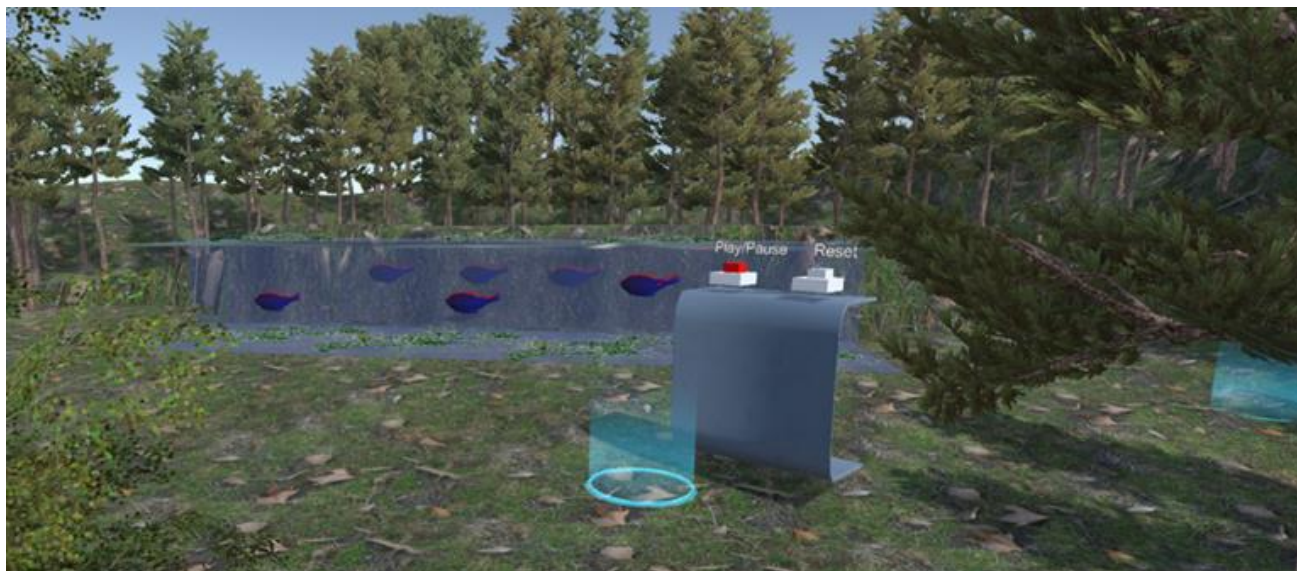


Figure 2 : Scène appréhendée par les étudiants sur les différentes technologies

Le contrat implicite établi avec les étudiants est le même dans les trois situations : interagir avec le milieu individuellement et en autonomie, avec l'objectif de comprendre le mécanisme d'eutrophisation, ses causes, ses conséquences. Pour les groupes 2 et 3, l'enseignant a expliqué le fonctionnement spécifique de l'animation proposée. Il était par ailleurs disponible aux côtés des étudiants du groupe 3 en cas de difficulté technique avec le système de réalité virtuelle.

Avant la séance, les étudiants ont répondu à un questionnaire pré-test pour évaluer leurs connaissances antérieures sur le sujet et leur intérêt pour les questions environnementales.

A l'issue de la séance, ils répondaient à quelques questions relatives à leur ressenti par rapport à l'expérience qu'ils venaient de vivre. Les mots-clés ont été recensés et des nuages de mots ont été réalisés pour faire ressortir ceux qui reviennent le plus souvent.

Une semaine après cette première phase, les étudiants ont dû répondre à un questionnaire post-test qui reprend la plupart des questions liées à leurs connaissances sur le sujet de l'eutrophisation. Ce délai d'une semaine entre la séance et le post-test permet de mettre l'accent sur les connaissances acquises à moyen-long terme.

Dans la foulée des post-tests, des entretiens semi-directifs par focus group ont été menés. Les groupes étaient constitués d'étudiants ayant vécu la même expérience. L'objectif des entretiens était de leur faire expliciter leur ressenti exprimé à l'issue de la séance. Ils ignoraient encore ce que les étudiants des autres groupes avaient fait. Une transcription des entretiens a été rédigée sous forme de synopsis, afin de dégager des conclusions sur l'intérêt de la RV pour l'acquisition des connaissances sur l'impact eutrophisation.

## 4 - Principaux résultats

### 4.1 - Pré-test

Lors du pré-test les étudiants ont déclaré majoritairement (59 %) être moyennement concernés par les questions liées à l'environnement (Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

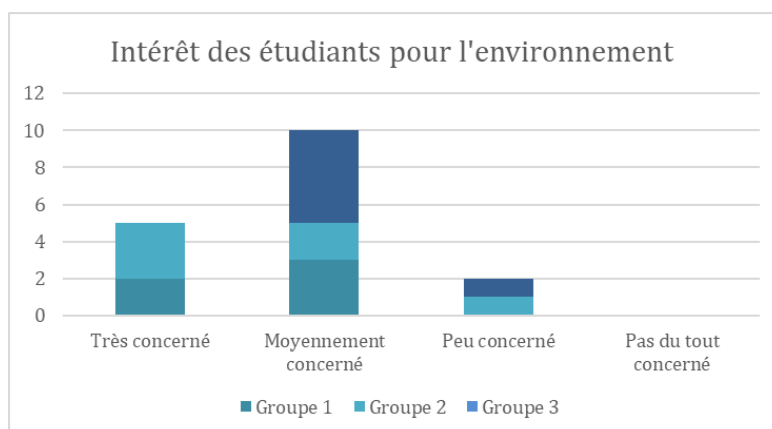


Figure 3 : Intérêt des étudiants pour les questions liées à l'environnement

Ils autoévaluent spontanément leurs connaissances en biologie comme médiocres, limitées voire nulles pour 70 % d'entre eux. Si tous ont passé un bac scientifique, 66 % ont passé un bac S-SI ou STI2D et ont donc arrêté la biologie après la classe de seconde.

Seulement 29 % des étudiants répondent à la question « Qu'est-ce que l'eutrophisation ? » (Figure 4) et parmi eux, un seul donne une réponse qui pourrait être considérée comme juste : « C'est le développement abusif d'algues qui dégrade l'environnement en empêchant la bonne présence d'oxygène dans l'eau ». Les autres répondants reconnaissent eux-mêmes ne pas être certains de leur réponse.

En analysant les mots-clés ressortant des réponses à cette question, nous nous rendons compte que les étudiants savent globalement que l'eutrophisation a un rapport avec l'eau, mais les connaissances des causes et conséquences du phénomène sont limitées. Certains étudiants confondent même le phénomène avec l'action d'atrophier, d'où le mot-clé « sectionner » (Figure 4).

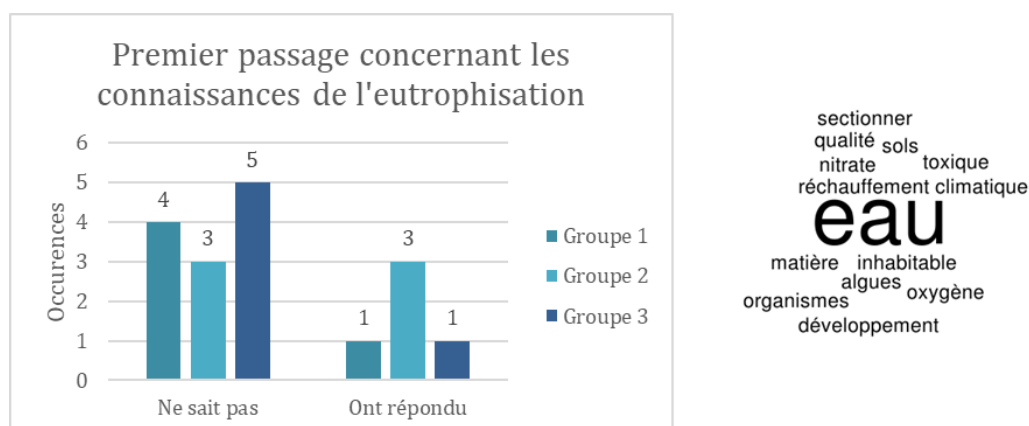


Figure 4 : Réponses des étudiants concernant les connaissances autour de l'eutrophisation, nuage de mots associés

Pour autant, à la question « Connaissez-vous le phénomène de marée verte ? », (qui est un cas particulier du phénomène d'eutrophisation), 71 % apportent une réponse positive, mais les définitions apportées restent approximatives (Figure 5). À noter que la moitié des non-répondants appartiennent au groupe 3.

Cette connaissance du phénomène des algues vertes n'est pas liée à leur origine : la plupart des étudiants n'est pas originaire de Bretagne, ils n'y vivent que depuis quelques mois.



Figure 5 : Réponse à la question « Connaissez-vous le phénomène de marée verte ? »

#### 4.2 - Ressentis

À l'issue de l'activité en groupe tous les étudiants déclarent avoir amélioré leurs connaissances.

Les étudiants devaient aussi indiquer leur ressenti durant l'expérimentation (Figure 6). Pour le groupe 1, les mots à connotation négative dominent dans le vocabulaire employé (couleur rouge), le groupe 2 est plus mitigé (couleurs orange et verte), tandis que le groupe 3 est clairement très positif (couleur verte).



Figure 6 : Ressentis des étudiants à la suite de leur passage

Cela met en évidence l'intérêt de la RV, avec son côté dynamique et immersif (groupe 3) par rapport au simple visionnage de vidéo où les étudiants sont passifs (groupe 1). Ce résultat doit être cependant un peu nuancé dans la mesure où un effet « wahou » lié à la nouveauté du dispositif peut avoir joué un rôle.

#### 4.3 - Post-test

On constate lors des post-tests que, quel que soit le dispositif utilisé, tous ont effectivement amélioré leur niveau de connaissance sur le sujet de l'eutrophisation. Tous connaissent dorénavant le mot eutrophisation et tout ou partie du phénomène correspondant (Figure 7).

Les étudiants des groupes 2 et surtout 3 ont une compréhension plus large du phénomène d'eutrophisation (causes, conséquences). Ainsi on peut imaginer que les étudiants du groupe, s'ils ont plus apprécié l'activité, n'ont pas pour autant été détournés de son caractère pédagogique.



Figure 7 : Réponse aux questions sur l'eutrophisation et le phénomène de marée verte

#### 4.4 - Entretiens par groupe

Lors des entretiens, les étudiants du groupe 1 ont qualifié la vidéo de « *juste factuelle* », qui « *ne joue pas sur les sentiments* ». Or ils considèrent que ce serait indispensable pour qu'ils s'intéressent au sujet : « *émotionnellement je n'étais pas dedans* », « *je n'ai été ni choqué ni intéressé* ». Il s'agit d'un public habitué à visionner des vidéos sur internet, mieux « *scénarisées* ». L'animation proposée ne correspondait pas à ces standards. « *J'ai eu l'impression un peu de revoir les cours en distanciel, en tout cas sur la vidéo en question* ».

A la différence des étudiants du groupe 1, les étudiants des groupes 2 et 3 déclarent ne pas s'être ennuyés et ne surestiment pas le temps qu'ils ont consacré à cette activité. Ceux du groupe 2 regrettent le manque d'une mise en contexte émotionnel au début du jeu, alors que ceux du groupe 3 estiment que les « *informations se suffisent à elle-même* ». « *Quand on voit les conséquences on s'imagine tous les impacts que ça peut avoir* ».

La connaissance du phénomène complexe de cause à effet d'un impact environnemental semble donc mieux comprise grâce aux outils immersifs de réalité virtuelle, mais l'apport n'est pas aussi franc qu'imaginé.

### 5 - Conclusions et perspectives

A l'issue de cette étude, notre principale constatation est que face à des animations, laisser le contrôle aux étudiants et les « *immerger* » dans la situation-problème grâce à la réalité virtuelle est plus efficace en termes d'implication et donc d'apprentissage.

Les étudiants ayant testé les systèmes interactifs (groupe 2 et 3) ont eu un ressenti plus positif que ceux qui n'ont fait que regarder une vidéo (groupe 1). Cela se traduit également en termes de résultats académiques. Alors que sur l'ensemble du cours les étudiants 3 ont eu globalement de moins bons résultats, leurs réponses aux questions spécifiques sur l'eutrophisation sont légèrement meilleures alors qu'il s'agissait précisément du groupe ayant le moins de connaissance initiale sur le sujet.

Ces résultats sont cependant à prendre avec précaution à la vue des faibles effectifs observés. L'étude doit être poursuivie sur les groupes plus nombreux et plus homogènes en termes de niveau initial. L'expérience peut ainsi être déployée chez différents partenaires universitaires. De nouvelles scènes de réalité virtuelle sur d'autres impacts environnementaux ont été développées à

l'Ecole normale supérieure de Rennes et peuvent faire l'objet d'expérimentations dans différentes formations pour enrichir le retour d'expériences.

## Références :

- [1]: NF EN ISO 14040: Management environnemental - Analyse de cycle de vie - Principes et cadre
- [2]: NF EN ISO14044 : Management environnemental - Analyse de cycle de vie - Exigences et lignes directrices
- [3]: Ministère (2022). Formations environnementales et insertion professionnelle - Synthèse des connaissances en 2022,  
<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/formations-environnementales-et-insertion-professionnelle-synthese-des-connaissances-en-2022>
- [4]: Mobiliser l'enseignement supérieur pour la transition écologique - Comment les enjeux climat-énergie sont enseignés dans le supérieur,  
<https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2018/11/Rapport-interm%C3%A9diaire-ClimatSup-V3.pdf>
- [5]: Lewis, F., Plante, P., Lemire, D. (2021). Pertinence, efficacité et principes pédagogiques de la réalité virtuelle et augmentée en contexte scolaire : une revue de littérature. *Médiations et médiatisations*, 5, p. 11-27 <https://doi.org/10.52358/mm.vi5.161>
- [6]: PWC (2020). The effectiveness of virtual reality soft skills training in the entreprise - A study. <https://www.pwc.com/us/en/services/consulting/technology/emerging-technology/assets/pwc-understanding-the-effectiveness-of-soft-skills-training-in-the-enterprise-a-study.pdf>
- [7]: Berney, S., Bétrancourt, M. (2016). Does animation enhance learning? A meta-analysis. *Computers and Education*, 101, p. 150-167, <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.06.005>
- [8]: Ploetzer, R. Berney, S., Bétrancourt, M. (2021). When learning from animations is more successful than learning from static pictures: learning the specifics of change. *Instructional Science*, 49, p.497-514, <https://doi.org/10.1007/s11251-021-09541-w>
- [9]: Amadiou, F., Tricot, A. (2020). Apprendre avec le numérique - Mythes et réalités, Paris, Retz.
- [10]: Markowitz, D.M., Laha, R., Perone, B. P., Pea, R. D., & Bailenson, J. N. (2018). Immersive Virtual Reality field trips facilitate learning about climate change. *Frontiers in Psychology*, 9 <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.02364>

Ressource publiée sur Culture Sciences de l'Ingénieur : <https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay>

# Économie circulaire chez Schneider Electric

Geoffrey RICHARD <sup>1</sup> et Andrée CLAR <sup>2</sup>

Édité le  
05/11/2024

école \_\_\_\_\_  
normale \_\_\_\_\_  
supérieure \_\_\_\_\_  
paris-saclay \_\_\_\_\_

<sup>1</sup> *Directeur économie circulaire, Schneider Electric*

<sup>2</sup> *Responsable relations presse, Schneider Electric*

*Cette ressource fait partie du N° 114 de La Revue 3EI du 1<sup>er</sup> trimestre 2025.*

Nous reprenons ici une grande partie du dossier de presse produit en septembre 2024 par le constructeur Schneider Electric, œuvrant dans la transformation numérique, la gestion de l'énergie et les automatismes, où il expose sa politique en matière d'économie circulaire. Dans ce texte, nous découvrons les solutions mises en œuvre et les nécessaires évolutions de l'organisation, de la gestion de la production et des outils industriels que cela implique.

## 1 - Introduction

En accompagnant la transition énergétique des entreprises, Schneider Electric a fait de la décarbonation sa priorité. Alors que les émissions de CO<sub>2</sub> commencent à fléchir en France [1], nous avons décidé de relever un autre défi majeur, celui de l'économie circulaire qui non seulement accélère la décarbonation de nos clients, mais nous permet également de protéger les ressources de la planète en produisant moins de choses neuves. Mais cela nécessite énormément de transformations pour mettre l'entreprise en ordre de marche. Le chantier est immense, à tous les niveaux. L'économie dite classique, c'est-à-dire linéaire (on extrait, on produit, on consomme, on jette), a atteint ses limites, les limites planétaires. Ces 20 dernières années, la production d'acier a doublé, celle d'aluminium a triplé. Un rapport de l'OCDE [2], publié en 2023, prévoit que la consommation mondiale de matériaux pourrait atteindre 167 milliards de tonnes par an en 2050, contre 100 milliards actuellement. Une consommation qui serait insoutenable en considérant les impacts sur la biodiversité ou la hausse induite des émissions de gaz à effet de serre. Eurométaux [3] nous apprend également que d'ici 2050, la transition énergétique créera un besoin encore supérieur en métaux mais que jusqu'à 65% de ces besoins pourraient être couverts par le recyclage. L'économie linéaire a donc vécu, place à l'économie circulaire !

### **Economie circulaire : facette majeure d'une économie plus viable et vertueuse**

Trop souvent réduite au recyclage, l'économie circulaire repose sur une meilleure utilisation des produits manufacturés : en allongeant leur durée de vie, en les réparant, les faisant évoluer ; et surtout, en les concevant pour améliorer leur performance environnementale et faciliter leur réparation. Le recyclage, incontournable, ne doit intervenir qu'en dernier recours. Selon le *Circularity Gap report 2023* [4], moins de 8% des matières premières extraites sont réutilisées. L'économie circulaire permettrait de répondre à l'ensemble des besoins au niveau mondial avec seulement 70% des matériaux extraits actuellement. Ce n'est plus une option ; les entreprises qui n'adopteront pas ce modèle ne pourront plus produire, confrontées à un manque de ressources et de matières premières, et contraintes par des réglementations beaucoup plus exigeantes.

## L'économie circulaire, c'est basculer dans l'inconnu à tous les niveaux

Mais basculer vers l'économie circulaire, c'est un peu basculer dans l'inconnu, en tous cas, tout repenser : la gestion des ressources, humaines et financières, le modèle économique, la gouvernance, les relations contractuelles, les processus de production, les processus qualité, la *supply chain*, les systèmes d'information, sans compter l'environnement externe qu'il faut adapter (fiscalité, réglementation, normes...). Imaginons un équipement utilisé au maximum de sa durée de vie et collecté par nos soins. Pour y parvenir, il faut contractualiser avec un client qui est devenu fournisseur. Dans les nouvelles conditions générales de vente, il faut apporter une réponse légale à de nouveaux risques alors que la jurisprudence n'existe pas encore. Puis il faut mettre au point de nouveaux procédés qualité, une nouvelle logistique avec de nouveaux partenaires capables de reprendre et d'acheminer les produits. Il faut les identifier, en assurer la traçabilité, leur attribuer une nouvelle fiche descriptive afin que ce produit puisse être considéré comme issu de l'économie circulaire. Nous cherchons à maximiser le réemploi des pièces et sous-ensembles dans nos réparations. Là aussi surgissent des problématiques juridiques, de traçabilité et de données. Sans compter le problème de trouver la place pour stocker physiquement les équipements à circulariser ainsi que les pièces de rechange "d'occasion" à l'heure où le foncier se fait rare. A l'autre bout de la chaîne, pour répondre à nos ambitions d'éco-conception, il faut parfois trouver des prestataires spécifiques pour tel ou tel matériau bio-sourcé ou issu du recyclage. Ils sont encore peu nombreux, alors que la diversification des fournisseurs est historiquement un gage de résilience. Ils sont aussi, en règle générale, plus onéreux ! Les difficultés sont nombreuses mais l'opportunité n'en reste pas moins à saisir. Car au-delà de ses avantages en matière environnementale, l'économie circulaire est un vecteur de développement économique local. Collecter, réparer, moderniser des équipements existants, tout cela se fait en France, en région, en s'appuyant sur des compétences locales, avec autant d'emplois et de filières qui se développent.

### Pour basculer : de la prise de risque et des talents

Basculer vers l'économie circulaire nécessite des investissements. Et de faire appel aux meilleurs talents de l'entreprise pour résoudre des problèmes qui ne s'étaient encore jamais posés ainsi. La prise de risque est donc importante, ces ressources ne pouvant être mises au service de projets de développements classiques. Alors pourquoi a-t-on décidé d'accélérer ? D'abord parce que nous sommes convaincus que demain, l'économie circulaire sera un vrai facteur de résilience et de robustesse des chaînes d'approvisionnement. Ensuite, parce que des études menées par Schneider Electric montrent que les produits issus de l'économie circulaire permettent de réduire en moyenne de 35% les émissions de CO<sub>2</sub> par rapport à une première fabrication. Après avoir travaillé depuis tant d'années sur la transition énergétique, nous pensons qu'il est incontournable de travailler sur la transition circulaire, qu'elle s'imposera naturellement à nous et à nos clients et que, comme dans toutes les grandes conquêtes, mieux vaut avoir un coup d'avance.

## 2 - Circularité : une approche « end-to-end »

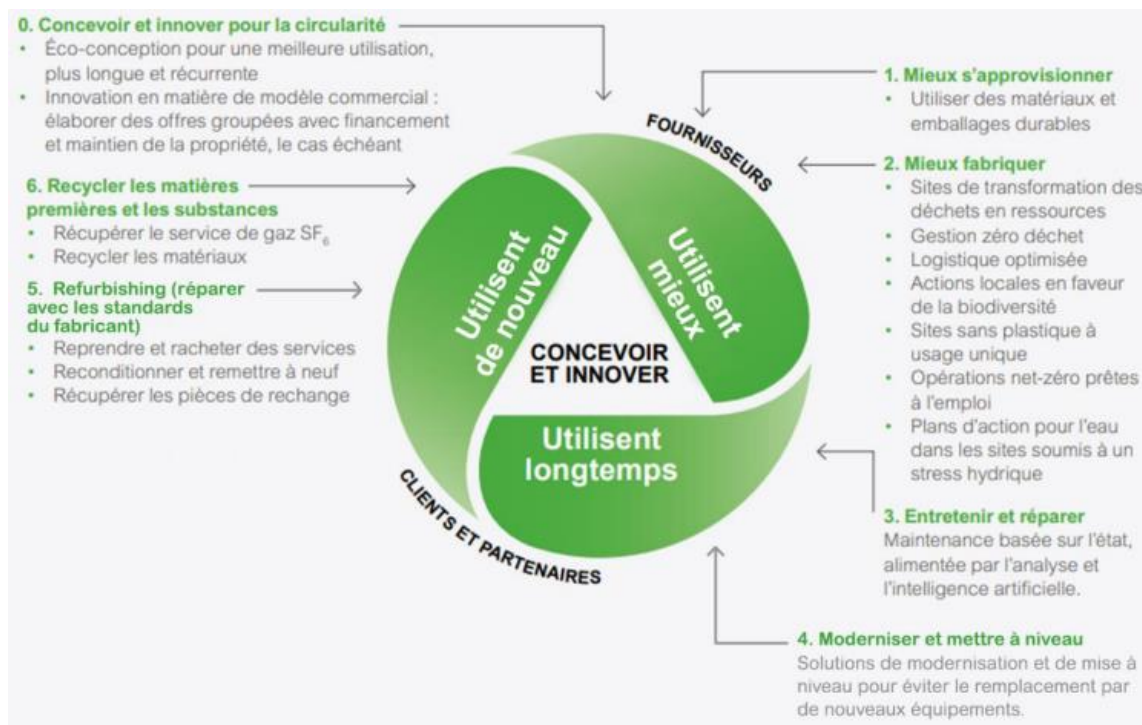


Figure 1 : Principes de la circularité pour Schneider Electric

### Les principes ci-dessus reposent sur cinq leviers chez Schneider Electric :

- le **reconditionnement** (correspond au label « Checked & repacked by Schneider Electric ») : remettre à disposition des équipements déjà produits mais non utilisés, ce sont les produits dits « non énergisés » : retours de SAV, emballages abîmés, commandés, livrés mais non mis en service...
- le **réemploi** (correspond au label « Refurbished by Schneider Electric ») : remettre en service et/ou moderniser des produits énergisés (utilisés) en changeant les pièces critiques et/ou d'usure.
- la **maintenance** : prolonger la durée de vie des équipements existants avec des programmes de maintenance et de réparation adaptés.
- la **modernisation** (en anglais : « Retrofit ») pour éviter l'achat d'un équipement neuf bénéficiant de nouvelles fonctionnalités ou d'innovations technologiques. C'est sur le site du Fontanil-Cornillon que sont effectuées ces opérations de *retrofit*.
- le **recyclage** : revalorisation des composants et matières premières dans un but de résilience de la *supply chain* et de réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.

### Les résultats obtenus par Schneider Electric sont résumés ici en quelques chiffres :

- 22 % des familles de produits présentent au moins une option de circularité,
- 420 000 tonnes de consommation de ressources primaires évitées d'ici 2025,
- 32 % de matériaux durables dans les produits. L'objectif est d'atteindre 50% en 2025,
- plus de la moitié des sites de production recyclent 99% de leurs déchets.

### Exemples de produits et services intégrant une approche circulaire :

- **PanelSeT SFN** est la première cellule HT en acier décarboné, fabriquée à Sarre-Union (Alsace) à partir de 50% d'acier décarboné obtenu à l'aide de matières premières recyclées et de sources

d'énergies renouvelables, telles que les énergies solaire et éolienne. Cette approche innovante permet une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> allant jusqu'à 34 %.

- Avec *EcoCare*, contrat de maintenance conditionnelle proposé par Schneider Electric, les équipements sont maintenus en fonction des besoins réels, grâce à un monitoring à distance et pas trop tôt pour éviter le changement de pièces encore utilisables, pas trop tard pour éviter les pannes. Avec *EcoCare*, les clients peuvent réduire jusqu'à 75% des risques de panne et jusqu'à 40% des coûts liés à la non-exploitation des équipements, tout en allongeant leur durée de vie.

- *EcoFitTM*. Les équipements et installations obsolètes gaspillent de l'énergie et augmentent les coûts d'exploitation, réduisant ainsi l'efficacité énergétique. *EcoFit* permet de moderniser les équipements et installations en prolongeant la durée de vie des actifs. Un équipement *EcoFit* c'est autant de garantie et jusqu'à 90% d'émissions de CO<sub>2</sub> en moins par rapport au remplacement par un équipement neuf.

- Les disjoncteurs *MasterPacT MTZ* « refurbished » offrent la même garantie que les produits neufs tout en contribuant à réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 29% et l'utilisation de matières premières vierges de 40% d'émissions de CO<sub>2</sub> en moins par rapport au remplacement par un équipement neuf.

Trois exemples d'intégration de la circularité chez les clients :

- *Digital Realty* : dans le *datacenter* PAR6 de Paris, une démarche d'économie circulaire a permis de réutiliser des éléments clés de l'infrastructure et des composants électriques, tout en lançant de nouveaux programmes de reprise, de recyclage et de remise à neuf. L'objectif est de créer une feuille de route qui sera étendue à tous les sites en Europe et qui devrait permettre à *Digital Realty* d'éviter 50% à 70% du carbone contenu dans ses onduleurs triphasés, tout en prolongeant le cycle des équipements et en lui permettant de réduire son impact sur l'environnement d'ici 3 à 5 ans.

- sur le projet "Six Degrés" (39 000 m<sup>2</sup> à Gentilly), Bouygues a choisi des appareillages (*Mureva* et *Unica*) provenant d'une démarche de réutilisation et des disjoncteurs MTZ « refurbished »

- en modernisant son installation d'embouteillage sur une période de 7 ans, Danone a réduit de 34% la consommation d'énergie par litre d'eau.

## 3 - Les défis du passage à l'économie circulaire à grande échelle

### 3.1 - L'éco-conception

La conception d'un produit est classiquement contrainte par trois critères : qualité, coût, délai. L'éco-conception ajoute le critère d'impact environnemental pour que chaque nouveau produit offre une meilleure empreinte environnementale que le précédent. Et contrairement à ce que l'on croît, l'impact environnemental d'un produit se joue en majorité à sa conception (de l'ordre de 70 à 80%) et non lorsqu'il est en fin de vie. C'est pourquoi l'économie circulaire chez Schneider Electric s'opère selon le triptyque « Use better, Use longer, Use again »

Allonger la durée de vie, faciliter la réparation, diminuer l'empreinte carbone, l'éco-conception permet d'utiliser moins de matière, moins d'énergie pour fabriquer, de diminuer l'impact sur l'environnement tout au long du cycle de vie. Ainsi, par exemple, dans la nouvelle gamme d'équipement de protection moyenne tension, le SF<sub>6</sub>, un gaz au très fort pouvoir de réchauffement climatique, a été remplacé par de l'air pur. C'est aussi un moyen de développer la circularité en utilisant des matériaux plus durables, issus du recyclage ou à l'empreinte carbone la plus faible possible, en facilitant la réparation et la maintenance de ce produit, en favorisant l'allongement de sa durée de vie, en donnant la possibilité de le reconditionner à nouveau ou d'utiliser certains

de ses composants comme futures pièces de rechange. Et penser aux processus de recyclage, une fois épuisées toutes les possibilités de réutilisation.

L'éco-conception est donc la pierre angulaire de l'économie circulaire pour tous les nouveaux produits à venir. C'est une nouvelle transformation à mener en parallèle des autres transformations, numérique et agile. Elles sont complémentaires et indissociables. La transformation agile permet des itérations successives pour arriver au résultat final. Un résultat qui sera forcément un compromis, le meilleur possible. Si l'on reprend l'exemple de la gamme *AirSeT*, remplacer le SF6 par de l'air a nécessité de renforcer certaines parois, signifiant plus de matière donc un poids supérieur, et plus de CO<sub>2</sub> émis à la fabrication et durant le transport. Mais cet ajout de matière a, de fait, amélioré la robustesse, donc la durée de vie. In fine, la performance environnementale sur l'ensemble du cycle de vie a été améliorée. Les arbitrages doivent donc se faire à tous les niveaux. Si l'on incorpore de l'aluminium recyclé, vaut-il mieux l'acheter dans un pays proche ou un pays plus lointain mais à l'électricité décarbonée ? Et bien entendu, au choix des matériaux viennent se greffer des tensions entre réparabilité et performance opérationnelle ou entre durée de vie et sobriété matérielle, par exemple.

Ces itérations et ces arbitrages ne peuvent bien s'effectuer qu'à deux conditions. La première, avoir mené à bien la transformation agile, soit une organisation avec un responsable produit et une équipe multidisciplinaire regroupant tous les acteurs concernés (marketing, R&D, production, qualité, finance...) pour chaque nouveau projet. La deuxième condition est de pouvoir s'appuyer sur des ingénieurs environnementaux à même de fournir les bonnes informations pour effectuer les arbitrages nécessaires à chaque itération. Chez Schneider Electric, une centaine d'ingénieurs de ce type travaillent pour couvrir toutes les lignes de produits. Outre ces deux conditions, la formation et la sensibilisation à l'éco-conception sont essentielles. En 2022, une académie interne dédiée a été créée avec plus de 20 modules spécifiquement conçus pour répondre aux différents niveaux de maturité sur le sujet. Avec l'appui de sponsors au plus haut niveau, 12 000 personnes sur les 15 000 travaillant à la R&D ont été formées. Enfin, la transformation numérique est également une condition sine qua non de l'éco-conception pour au moins deux raisons. La première est la nécessité de doter les équipements produits de modules communicants pour récolter de la donnée afin de mieux les surveiller, optimiser leur fonctionnement leur maintenance, et donc leur durée de vie. La seconde est la possibilité de tracer et documenter chaque itération, chaque arbitrage réalisé, afin de pouvoir argumenter face aux clients désireux de connaître les performances des équipements et les comparer. Un onduleur récemment éco-conçu affiche, par rapport à sa précédente version, un gain de 25% en efficacité énergétique, 80% de matière recyclée et une baisse de 30% de l'empreinte carbone.

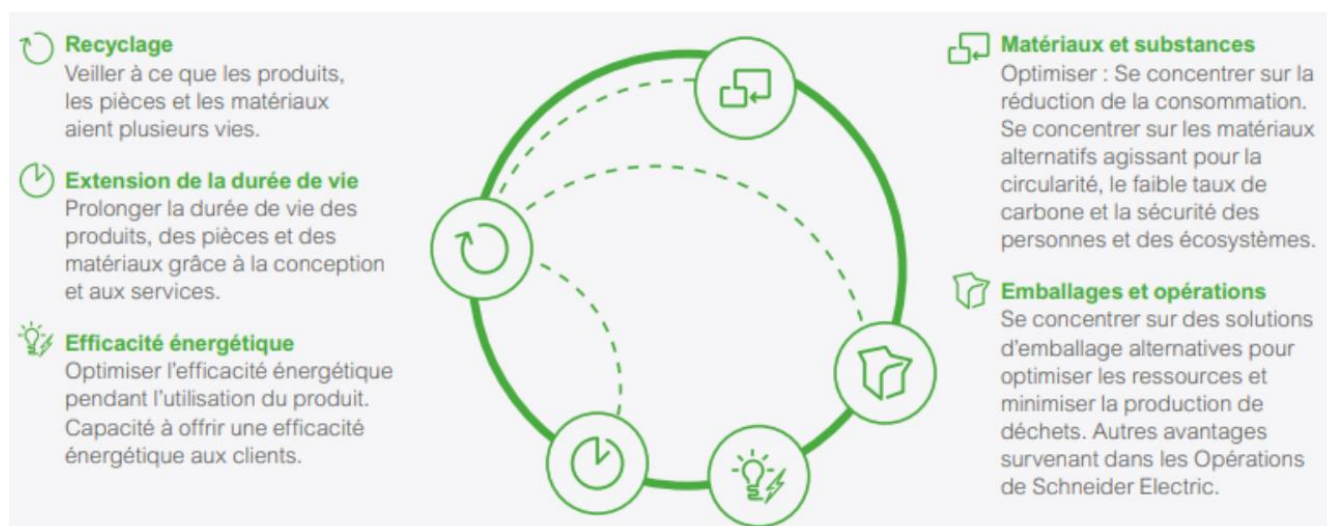


Figure 2 : Circularité et éco-conception chez Schneider Electric

## 3.2 - Bousculer la supply chain pour développer l'économie circulaire

Schneider Electric fournit des équipements électriques (basse et moyenne tension) et des automatismes industriels : des équipements critiques pour la sécurité et l'excellence opérationnelle, à forte valeur ajoutée et avec une durée de vie pouvant atteindre plusieurs dizaines d'années. Le groupe a une expertise historique de l'économie circulaire à travers la maintenance et la réparation des dits équipements, avec plusieurs sites dédiés en France. Mais à l'heure de l'accélération du développement de la circularité, récupérer des équipements pour les reconditionner, les réparer ou en extraire des pièces détachées pour en réparer d'autres, implique des changements profonds dans l'organisation de la *supply chain*.

### Récupérer les équipements jugés en fin de vie des clients, un véritable casse-tête logistique

Détériorés pendant le transport, déjà utilisés et jugés en fin de vie, ou non utilisés mais stockés un certain temps chez les clients, ces équipements à réparer pour leur donner une seconde vie ou donner une seconde vie à leurs pièces détachées, doivent être ramenés vers les usines. Cela entraîne déjà, par exemple, des complexités juridiques quant au transfert de propriété. Sans compter la contractualisation avec des acteurs inhabituels pour Schneider Electric, comme les cureurs ou les démolisseurs dans le secteur du BTP permettant de récupérer les équipements électriques voués à la mise au rebut. Il s'agit également d'un véritable casse-tête logistique car ces équipements sont, la plupart du temps, considérés comme des déchets et les prestataires de transport classiques ne sont pas organisés pour les prendre en charge. Cela suppose des capacités de stockage et des procédures administratives spécifiques, comme des bons de suivi de déchets, ou un statut juridique particulier. Depuis que Schneider Electric a décidé d'accélérer sur l'économie circulaire, deux acteurs seulement ont été identifiés pour assurer ce type de prestation.

### Plus de compétences en diagnostic

Une fois les équipements dûment réceptionnés, il faut les diagnostiquer. Ce qui nécessite des compétences spécifiques qui n'existent pratiquement pas en l'état, mêlant expertise du contrôle qualité et connaissance desdits équipements. Car l'engagement de Schneider Electric est que ces équipements issus de l'économie circulaire apportent les mêmes garanties pour ces offres que pour des produits neufs issus de l'économie linéaire. La connaissance des équipements est plutôt l'apanage des techniciens intervenant en maintenance chez les clients, alors que le contrôle qualité est plutôt le fait des personnels des sites de production. Il faut donc faire monter en compétence des techniciens confirmés et former de nouvelles personnes pour absorber la hausse de l'activité circulaire. De leur côté, les opérateurs dédiés à la réception des produits doivent également être formés pour traiter ces nouveaux flux et les acheminer vers de nouvelles lignes de production. Et que dire de l'ordonnancement des équipes et des plannings à établir avec des flux difficiles à déterminer, contrairement à des livraisons de produits ou de commandes standards ?

### Autre défi d'importance, l'évolution de l'IT

Le basculement vers l'économie circulaire a également des conséquences sur les flux de données. Pour être vendus, les nouveaux produits circulaires doivent apparaître dans les stocks et être proposés aux futurs clients. Avec une nouvelle complexité : un même produit peut être dans différents états de son cycle de vie : neuf, reconditionné ou encore « refurbished ». Un travail sur les données est nécessaire pour assurer la traçabilité de ces équipements, leur attribuer un nouveau PIM (Product Information Management), une nouvelle fiche descriptive (PPE) et une performance environnementale. Cela implique une adaptation de nos bases de données et la création de nouveaux flux, afin d'apporter à nos clients une expérience d'achat identique aux produits neufs et

maintenir des procédures efficaces. Chez Schneider Electric, une équipe d'une centaine de personnes a travaillé sur ces problématiques pendant près d'un an.

### 3.3 - L'économie circulaire, un modèle économique à inventer et à défendre

#### Économie circulaire : un nouveau modèle de valeur qui deviendra la norme

Notre parti pris est d'intégrer l'économie circulaire au business pour en faire un modèle pérenne et au service des clients. C'est pour cela que Schneider Electric a fait le choix de produits circulaires n'ayant pas moins de valeur mais autant et garantis au même niveau que les équivalents en neuf. Ils ont même une valeur ajoutée supplémentaire : leur meilleure performance environnementale. On estime qu'un équipement issu de l'économie circulaire affiche un bilan carbone en moyenne inférieur de 35% à celui d'un produit neuf. Et beaucoup de nos clients, environ deux tiers, sont prêts à payer ce prix, convaincus de la nécessité et des vertus de l'économie circulaire. Un exemple marquant : celui de Bouygues Energies & Services qui, pour « Six Degrés » (39 000 m<sup>2</sup> à Gentilly) a fait le choix volontariste de contenir l'empreinte carbone du projet en choisissant des produits issus de l'économie circulaire. Schneider Electric a fourni l'appareillage et des disjoncteurs « refurbished » qui ont été sauvés de la destruction et cédés avec la même garantie qu'un produit neuf.

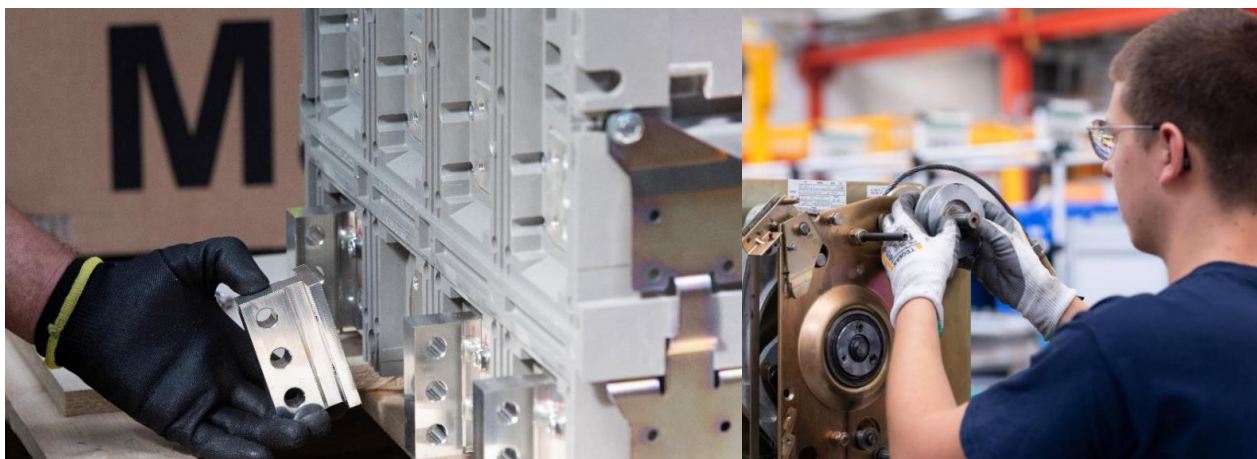


Figure 3 : Montage de disjoncteurs chez Schneider Electric

#### Des produits qui nécessitent des investissements et un travail important

Le second facteur justifiant un prix équivalent au neuf des produits de l'économie circulaire est le niveau d'investissements nécessaires. Il faut réorganiser la logistique pour récupérer les produits en fin de vie, pour les réparer ou les démanteler pour récupérer des pièces de rechange. Il faut faire monter en compétence des opérateurs sur de nouvelles expertises plutôt rares comme les diagnostics et installer de nouvelles lignes de production. Citons l'exemple de l'équipement de test et de contrôle qualité identique à celui de l'usine d'origine pour notre gamme Altivar et qui coûte 400 000 euros. Pour intégrer des matières recyclées comme le cuivre, les processus de production ont été audités. Il y a aussi des investissements en R&D à effectuer pour parvenir à retraiter et recycler certaines matières premières, par exemple le germanium, incontournable pour améliorer la conductivité électrique. Les investissements informatiques sont également très importants car il faut gérer ces nouvelles références, avec des obligations de traçabilité et de nouvelles interfaces d'e-commerce et de commande pour les clients désireux de basculer sur des équipements issus de l'économie circulaire. Sans compter qu'il faut atteindre une taille critique de projet pour soutenir le développement de filières ou accéder à des gisements secondaires diffus ou plus difficiles d'accès. Il y a également les surcoûts juridiques avec de nouvelles conditions générales de vente, des transferts de propriété, de nouveaux risques à évaluer... Et tous ces surcoûts et investissements

doivent être financés dans un environnement réglementaire et fiscal encore peu incitatif, même si beaucoup a déjà été fait : loi AGEC, la RE2020 et les responsabilités élargies de filières toujours plus nombreuses. Citons aussi le renchérissement du prix de la tonne de carbone.

## 4 - Un outil industriel qui s'adapte à l'économie circulaire

Trop souvent réduite au recyclage, l'économie circulaire repose sur une meilleure utilisation des produits : éco-concevoir des produits avec une meilleure performance environnementale, en augmentant leur durabilité, leur réparabilité et leur « serviceabilité » (facilité de maintenance et de modernisation) favorisant ainsi l'allongement de leur durée de vie. Le recyclage, incontournable, ne doit n'intervenir qu'en dernier recours. La France, à la fois vitrine et pays pilote pour l'ensemble du Groupe quant à l'économie circulaire, possède plusieurs sites industriels spécifiquement aménagés. Nous allons vous en présenter quatre, chacun répondant à un objectif de l'économie circulaire pour réduire la consommation de ressources et les émissions carbone du produit, avec un impact positif sur le bilan carbone de nos clients :

- **Reconditionner et remettre à disposition des équipements déjà produits mais non utilisés** (correspond au label « **Checked and repacked by Schneider Electric** »). Ce sont les produits dits « non énergisés » (retours de SAV, emballages abimés, commandés, livrés mais jamais mis en service...). Ces opérations sont assurées par le **site logistique situé à Evreux, dans l'Eure**.

Plus gros centre logistique Schneider Electric au niveau mondial, le centre d'Evreux permet de couvrir toutes les activités logistiques de l'économie circulaire (transport, stockage, distribution, exposition des stocks vers les plateformes web). En Septembre 2024, le site logistique de Schneider Electric à Evreux abritera un « Repack Center ». Encore modeste, quelques centaines de m<sup>2</sup> sur les 42 000 m<sup>2</sup> du site, celui-ci va reconditionner et remettre à disposition des équipements non énergisés. Ce sont des équipements qui n'ont pas été mis en service pour diverses raisons : retours de SAV, emballages abimés donc retournés, livrés mais jamais utilisés... Auparavant, ces équipements étaient destinés au rebut ; désormais ils vont être remis sur le marché ou démantelés pour récupérer leurs divers composants et recyclés.

### Un centre logistique pour récupérer les équipements à reconditionner

Avec ce « Repack Center », Evreux devient un site incontournable pour la stratégie économie circulaire de Schneider Electric. C'est le 5<sup>ème</sup> en superficie, et, surtout, le premier en termes de valeur, avec 15% du chiffre d'affaires mondial, hors software. En 2020, le site est doté d'une *supply chain* de service, capable de livrer des pièces pour réparation en moins de 24h à la demande d'un client comme un industriel ou un hôpital, par exemple. Avec sa position, son importance, et ses connexions avec les partenaires distributeurs et les clients, il était naturel d'y inclure cette activité de reprise des équipements non énergisés, permettant à Schneider Electric de couvrir toutes les boucles de l'économie circulaire. Il stocke également les produits réparés pour les livrer aux clients demandeurs.

### Une ligne dédiée au reconditionnement

Outre les modifications propres à la logistique pour récupérer les équipements non énergisés, il a fallu installer une ligne dédiée au diagnostic et au reconditionnement. A chaque fois qu'un tel produit arrive, il fait l'objet d'un diagnostic et se pose la question : ce produit peut-il être reconditionné simplement ou doit-il être réparé ou, en dernier recours recyclé ? Il sera alors expédié vers l'usine de notre partenaire *Weecycling*, aux alentours de Fécamp, qui récupérera le cuivre et l'argent. Dans les deux premiers cas, il sera remis sur le marché avec les mêmes garanties, les mêmes capacités techniques qu'un produit neuf. S'il doit être « seulement » reconditionné, cela sera fait sur la nouvelle ligne du site avec un emballage en carton neutre mais muni de notre logo «Checked & Repacked».

- **Réemployer** (correspond au label « **Refurbished by Schneider Electric** ») : remettre en service et/ou moderniser des produits énergisés (utilisés) en changeant les pièces critiques et/ou d'usure. Ce sont les sites de **MasterTech de Moirans en Isère** et de **Privas en Ardèche** qui en ont la charge.

Le site MasterTech de Moirans, à côté de Grenoble, produit l'une des solutions phares de la gamme Schneider Electric, le MasterPacT. C'est un disjoncteur de tableau électrique basse tension, un élément clé de la sécurité électrique dans les usines mais aussi les bâtiments tertiaires comme les immeubles d'habitation, de bureaux ou les hôpitaux. Depuis 2020, l'usine MasterTech de Moirans propose des MasterPacT « refurbished », c'est-à-dire des produits ayant déjà été utilisés mais entièrement réparés, contrôlés et testés et bénéficiant des mêmes garanties. Cela permet d'économiser 231 kg de CO<sub>2</sub> par équipement et d'éviter d'utiliser trop de nouvelles ressources.

#### **Une ligne dédiée parmi les lignes de production d'équipements neuf**

Ces MasterPacT « refurbished » nécessitent les mêmes compétences que pour produire les neufs. C'est donc tout naturellement que la ligne dédiée à la réparation trouve sa place au sein de l'usine de Moirans. Les MasterPacT déjà utilisés sont réceptionnés, démontés, diagnostiqués et toutes les pièces critiques sont testées. Ils bénéficient des dernières versions des équipements Micrologic (contrôle et mesure des disjoncteurs). Puis ils sont testés et diagnostiqués selon les mêmes processus que les produits neufs. La décision d'inclure cette ligne de réparation dans l'usine de production permet de disposer des personnels qualifiés, mais aussi de mutualiser des investissements comme les bancs de tests dont le coût s'élève à plusieurs centaines de milliers d'euros. Autre avantage : sur 4 références, le délai de disponibilité est de 48h seulement contre deux semaines habituellement. Preuve encore que l'économie circulaire est gage de résilience, lors des tensions d'approvisionnement post-covid, l'usine a été en mesure de fournir des produits circulaires en 3-4 semaines contre 4-6 mois d'attente pour les produits neufs en moyenne.

#### **Des investissements nécessaires en capacité de stockage**

Outre la ligne de réparation, le site de Moirans a dû augmenter sa capacité de stockage pour recevoir ces MasterPacT à réparer. Certains n'étant pas jugés conformes sont entièrement démantelés mais certains de leurs composants encore valables doivent être aussi stockés pour permettre de réparer d'autres MasterPacT. Les flux logistiques ont dû également être repensés pour prendre en charge ces équipements. L'usine de Moirans étant auparavant entièrement dédiée à la production d'équipements neufs, elle était pensée pour recevoir des matières premières et des composants achetés auprès des fournisseurs de Schneider Electric. Flux prévisibles et prévus, donc, ce qui n'est pas le cas des produits à réparer.

- **Prolonger la durée de vie des équipements existants avec des programmes de maintenance et de réparation adaptés.** Cela se passe sur les sites de **Privas, en Ardèche** et du **Fontanil-Cornillon en Isère**.

Schneider Electric a fait du site de Privas le site de réparation de tous les produits comportant de l'électronique, en s'appuyant sur son expertise historique. A Privas, en Ardèche, sur 6000 m<sup>2</sup> d'ateliers, plus de 130 techniciens et techniciennes avec une forte expertise en électronique, produisent, mais surtout réparent et revalorisent des équipements usagés ou défectueux. Une fois réparés (« refurbish »), ceux-ci sont remis sur le marché avec les mêmes garanties, les mêmes capacités techniques que des produits neufs. Il est devenu le plus important centre de réparation de Schneider Electric en Europe. A Privas, on remet en conditions opérationnelles des onduleurs, mais aussi des automates industriels, des variateurs de vitesse, des équipements de gestion technique des bâtiments, bref, tous les produits Schneider Electric incorporant de l'électronique, des batteries et des interfaces hommes-machines.

## La réparation, une activité historique au service de l'économie circulaire



Figure 4 : Usine de Privas, Ardèche

Depuis plus de 40 ans, le site de Privas produit, en petites séries, des onduleurs et des cartes électroniques, incluant la réparation et la maintenance. Avec l'évolution de la réglementation concernant les batteries, composant principal d'un onduleur, le site s'est progressivement doté de compétences en recyclage et revalorisation. Et, depuis 2020, Schneider Electric en a fait un de ses sites phares pour l'économie circulaire, dédié quasiment exclusivement à la réparation et à la fabrication de pièces détachées de rechange. En 2023, on comptabilisait 6 000 équipements réparés, 20 000 pièces de rechanges, ainsi que 15 000 cartes électroniques produites.

### Formation et changement à tous les niveaux

Faire passer Privas d'une usine de production de petites séries au site de référence européen de réparation de tous les produits électroniques du Groupe a constitué une petite révolution. Il a fallu tout changer ou presque, même la structure financière avec une nouvelle façon de comptabiliser les stocks, mais aussi la prise en compte de nouveaux flux financiers. Ainsi, l'offre *Standard Exchange* a un impact significatif. Elle prévoit, en cas de problème, le renvoi d'un équipement, et la fourniture d'un produit équivalent (circulaire ou neuf), pendant toute la durée de la réparation. La partie logistique a dû être repensée pour gérer les flux de retour d'équipements à réparer en parallèle des flux de réception des pièces de rechange, notamment. Enfin, il a fallu former une bonne partie des techniciens au diagnostic, étape primordiale, avant la réparation, les tests de fonctionnalité et la réexpédition.

- **Moderniser pour éviter l'achat d'un équipement neuf bénéficiant de nouvelles fonctionnalités ou d'innovations technologiques.** C'est sur le site du Fontanil-Cornillon que sont effectuées ces opérations de *retrofit*.

C'est le plus important site de service et de retrofit de Schneider Electric en Europe. Son activité historique est la réparation et la maintenance d'équipements. Mais, depuis, 2022, il a été aménagé pour supporter *EcoFit™*, les services de modernisation et de circularité de Schneider Electric.

### Prolonger la durée de vie des équipements et réduire leur empreinte carbone

Les solutions *EcoFit™* de Schneider Electric permettent de moderniser les équipements anciens ne bénéficiant pas des dernières innovations et fonctionnalités, améliorant ainsi leur efficacité et réduisant leurs coûts d'exploitation. Certains équipements, tels que les automates industriels ou les tableaux électriques moyenne tension, sont conçus pour durer durant plusieurs décennies. Cependant, depuis leur mise en service, les avancées technologiques (logicielles, matérielles, électroniques...) se sont accélérées, rendant ces équipements potentiellement dépassés, bien qu'ils restent fonctionnels.

Plutôt que de les remplacer entièrement, Schneider Electric propose à ses clients une modernisation ciblée afin d'étendre leur durée de vie et leur efficacité. Cette approche consiste à remplacer uniquement les composants clés, comme l'installation d'un nouveau disjoncteur

*EasyPact EXE* sans gaz SF<sub>6</sub> dans la cellule moyenne tension *Fluair 100/200*. Ces solutions de modernisation intègrent également les dernières innovations en matière de connectivité, telles que les capteurs thermiques et environnementaux permettant une maintenance conditionnelle avec analyses prédictives sur les disjoncteurs basse tension comme le *MasterPacT M, NT, NW* et *MTZ*. Ce processus, appelé "retrofit", permet d'allonger la durée de vie des équipements et d'éviter jusqu'à 90% d'émissions de CO<sub>2</sub> en ne remplaçant que les composants nécessaires.

### Des modules conçus et adaptés pour une modernisation optimisée

Le site *Smart EcoFit*<sup>™</sup> dispose d'une ligne de production dédiée à la fabrication de modules spécifiquement conçus pour les équipements à moderniser, tels que les gammes *Belledone* et *Fluair* en moyenne tension, ou *MasterPacT M, NT, NW* en basse tension. Grâce à ces modules préfabriqués à Fontanil-Cornillon, les techniciens de Schneider Electric peuvent intervenir sur le site client et réaliser le retrofit des équipements en moins de deux heures, minimisant ainsi l'interruption de l'alimentation. De plus, tous les modules sont équipés avec de capteurs thermiques et environnementaux, comme le *PowerLogic*<sup>™</sup> *Thermal Tag TH110* ou le *PowerLogic*<sup>™</sup> *Environmental Tag CL110*, permettant de détecter les problèmes de connectivité, de température ou de condensation et de transmettre ces informations à notre centre d'expertise. Les équipements modernisés pourront ainsi être contrôlés à distance et peuvent être intégrés dans un programme de maintenance conditionnelle qui améliore leur efficacité opérationnelle et prolonge leur durée de vie.

### Contrats de maintien en condition opérationnelle (MCO) reposant sur des pièces et produits de l'économie circulaire

Schneider Electric propose à ses clients des contrats de maintien en condition opérationnelle (MCO) pour des gammes d'équipements anciennes, non commercialisées, mais toujours en service chez certains d'entre eux. Pour ces gammes, Schneider Electric récupère sur le site *Smart EcoFit*<sup>™</sup> des équipements ou pièces de rechange d'occasion, mais toujours fonctionnels. Ces éléments sont ensuite réutilisés pour assurer le maintien en condition opérationnelle et le bon fonctionnement des installations des clients, prolongeant ainsi leur durée de vie. Ces contrats MCO sont notamment disponibles pour les anciennes gammes *Fluokit M*, des tableaux électriques de distribution secondaire (moyenne et basse tension) utilisés dans divers secteurs : parcs éoliens, industrie et bâtiment.

### Centre de formation des techniciens d'interventions



Figure 5 : Centre de formation des techniciens d'intervention

Le site de Fontanil-Cornillon abrite également notre Centre de Formation des techniciens d'interventions pour réparer les produits Schneider Electric sur les sites de nos clients. C'est l'un des deux centres européens (le deuxième est situé en Italie et dédié plus spécifiquement au

« cooling »). 104 cours sont disponibles qui couvrent l'ensemble des produits Schneider Electric. 2144 personnes ont été formées en 2023 par 20 formateurs qui cumulent 284 ans d'expérience !

Ces quatre sites sont connectés avec des partenaires de recyclage et revalorisation pour améliorer notre résilience matière. Les deux premières catégories de produits bénéficient des mêmes garanties que des produits neufs et sont identifiés des deux labels Schneider :

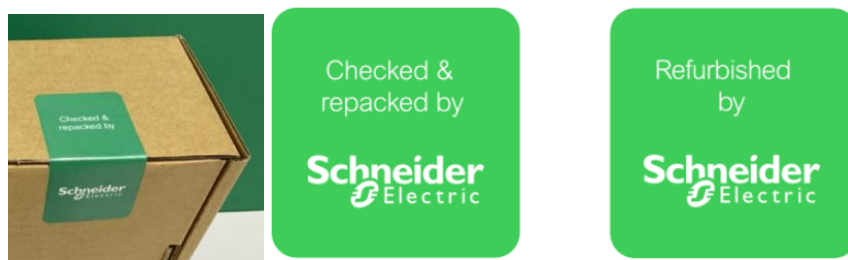


Figure 6 : Labels Schneider Electric pour les produits jamais mis sous tension et reconditionnés / pour les offres de réemplois remises à neuf. Remplacent le label "circular certified"

Pour aller plus loin sur ce sujet, vous pouvez consulter les actualités du constructeur ici : <https://www.se.com/fr/fr/about-us/newsroom/keyword/details/economie-circulaire-5bd18dd42d40ce0b21021c48>

## Références :

[1]: <https://www.ecologie.gouv.fr/actualites/france-reduit-encore-ses-emissions-co2-2023#:~:text=Selon%20les%20premi%C3%A8res%20estimations%20du%20Citepa%2C%20les%20%C3%A9missions,indicatif%20pour%202023%20qui%20est%20de%20397%20MtCO2e>.

[2]: <https://www.oecd.org/fr/topics/policy-issues/resource-efficiency-and-circular-economy.html#:~:text=Selon%20une%20mod%C3%A9lisation%20r%C3%A9cente%20de,mati%C3%A8re%20de%20soutien%20aux%20pays>.

[3]: <https://www.eurometaux.eu/media/nmsjl0dj/2022-policymaker-summary-report-final.pdf>

[4]: <https://www.circularity-gap.world/2023>