

<sup>1</sup> ENS Rennes, Laboratoire SATIE

<sup>2</sup> Mitsubishi Electric R&D Centre Europe

*Cette ressource fait partie du N° 113 de La Revue 3EI du 3<sup>ème</sup> trimestre 2024.*

Cette ressource présente quelques éléments informatifs sur l'ACV et l'éco-conception en génie électrique et systèmes énergétiques. Le contenu est extrait de deux articles rédigés par les auteurs dans les techniques de l'Ingénieur parus en 2024 [28] [29].

## 1 - Introduction

On estime à environ **50 millions de tonnes** la quantité de DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques) générée en 2018 dans le monde, selon un rapport piloté par l'Organisation des nations unies (ONU). Et celle-ci pourrait atteindre 120 millions de tonnes d'ici 2050 si rien ne change. Sans surprise, ce sont les pays occidentaux et développés qui sont les plus grands producteurs et exportateurs de DEEE. Chacun en rejette 17,7 kg/habitant/an. La gestion des DEEE est directement liée aux matériaux qui les composent (une grande hétérogénéité) et de leur taux de criticité. La Commission Européenne définit une 30<sup>ème</sup> de matériaux critiques, des matières premières pour lesquelles il existe un risque de difficulté d'approvisionnement du fait de la situation géographique des gisements, l'énergie nécessaire à l'extraction, les besoins présents et futurs. Les enjeux sont également environnementaux, la pollution de la planète n'est plus à prouver et les dégradations écologiques lors de la décomposition des éléments dangereux, les intoxications, étouffements ou blessures causés à la faune lorsqu'elle absorbe ou s'accroche aux déchets sont des événements, hélas, courants. En 2015, seul 1% des DEEE collectés en France a échappé à la destruction ou enfouissement, pour être réutilisé.

Dans le domaine de l'énergie, aujourd'hui, les convertisseurs de puissance sont conçus pour présenter le meilleur coût et/ou volume sous contraintes thermiques, ou pour présenter le meilleur rendement sous contraintes de coût et/ou de volume. Cependant, nous pensons que l'optimisation de la conception devrait se faire sur l'ensemble du cycle de vie en tenant compte des matériaux utilisés, des pertes cumulées, de l'énergie incorporée et des impacts liés à leur fabrication tout comme leur déconstruction/recyclage.

Les dispositifs du génie électrique ont une place privilégiée et spécifique dans cette indispensable quête de développement soutenable. Tout d'abord, car ils représentent un maillon majeur dans l'efficacité énergétique des process industriels. Ensuite, ils sont eux-mêmes des consommateurs et des producteurs d'énergie électrique, notamment d'origine renouvelable, et dont il est important de minimiser leur impact environnemental. Enfin, leur nombre ne cesse de croître à la fois au niveau industriel que grand public. L'analyse sur cycle de vie (ACV) est une méthode adéquate pour quantifier et analyser les impacts environnementaux d'un produit.

Dans cet article, il s'agira de préciser le contexte des ACV, de donner quelques outils, méthodes et données d'ACV liés au génie électrique et enfin d'illustrer le propos au travers des exemples du génie électrique.

## 2 - Cadre législatif et normatif

La réglementation de l'écoconception du Génie Électrique est définie par des normes ou/et des directives. Les normes et les directives relatives à l'écoconception de systèmes électriques ont plusieurs objectifs clés, qui incluent :

1. Encourager l'amélioration de l'efficacité énergétique des produits électroniques de puissance : établir des exigences en matière d'efficacité énergétique, de consommation d'énergie en mode veille, et de modes de fonctionnement pour inciter les fabricants à produire des systèmes électriques plus efficaces énergétiquement.
2. Réduire l'utilisation de substances dangereuses : imposer des restrictions sur l'utilisation de substances dangereuses comme le plomb, le mercure et le cadmium, qui sont nocives pour l'environnement et la santé humaine.
3. Promouvoir la durabilité et la réparabilité : encourager les fabricants à concevoir des produits électroniques de puissance qui peuvent être réparés et mis à niveau, prolongeant ainsi leur durée de vie et réduisant le volume de déchets électroniques.
4. Établir des critères pour la fin de vie des produits : établir des critères pour la collecte, le traitement et le recyclage des déchets électroniques, ce qui contribue à réduire les impacts environnementaux liés à l'élimination des produits en fin de vie.
5. Améliorer la transparence et la communication : encourager la transparence sur les performances environnementales, en exigeant la communication d'informations sur l'impact environnemental et les caractéristiques des produits.

En somme, les normes sur l'écoconception de systèmes électriques ont pour but de promouvoir des pratiques de conception plus durables et respectueuses de l'environnement, tout en améliorant la qualité et les performances des produits électroniques de puissance.

### 2.1 - Acteurs

L'établissement de normes/directives en écoconception implique la participation de plusieurs acteurs, présentés dans le tableau 1. Ces acteurs travaillent conjointement.

Tableau 1 : Les principaux acteurs de l'écoconception.

Organismes de normalisation	Ce sont les principaux acteurs impliqués dans l'élaboration et la mise à jour des normes. Ces organismes comprennent des organisations nationales telles que l'AFNOR en France, le DIN en Allemagne, le BSI en Grande-Bretagne, et des organisations internationales telles que l'IEC, ISO et CENELEC.
Fabricants	Les fabricants sont souvent impliqués dans le développement de nouvelles normes et de nouvelles méthodes d'évaluation.
Associations professionnelles	Elles représentent les intérêts des fabricants et des fournisseurs de l'industrie.
Organisations gouvernementales	Les gouvernements ont un rôle important dans l'élaboration de réglementations et de politiques en matière d'écoconception. Ils fournissent des conseils et encouragent l'adoption de normes et de réglementations.

### 2.2 - Cadre normatif et législatif

Le tableau 2 présente une liste de normes génériques fournissant des lignes directrices pour la prise en compte d'aspect environnementaux pendant la phase de conception d'un produit [1].

Tableau 2 : Normes concernant la mise en œuvre de l'écoconception et l'évaluation de l'impact environnemental

ISO 14006:2020	Lignes directrices pour intégrer l'écoconception
ISO 14009:2020	Lignes directrices pour intégrer la circularité des matériaux
ISO 14031:2021	Évaluation de la performance environnementale - Lignes directrices
ISO 14040:2006	Analyse du cycle de vie - Principes et cadre
ISO 14044:2006	Analyse du cycle de vie - Exigences et lignes directrices

Des normes sectorielles, plus spécifiques aux systèmes électriques sont présentées ci-dessous.

- La norme EN 50598 - Écoconception pour l'électrotechnique : cette norme fournit des directives pour l'évaluation environnementale et fournit une méthodologie pour la réalisation de l'analyse du cycle de vie (ACV) des produits électroniques. Elle est applicable à une large gamme de produits électrotechniques, tels que les alimentations électriques, les variateurs de vitesse et les moteurs électriques.
- La norme IEC 62430 - Conception écologique pour les produits électriques et électroniques : cette norme fournit des exigences et des lignes directrices pour la conception des produits électrotechniques. Elle couvre des aspects tels que la réduction des substances dangereuses, l'efficacité énergétique, la recyclabilité et la gestion de cycle de vie.
- La norme IEC 61724 - Systèmes de surveillance de la performance des systèmes photovoltaïques : cette norme fournit des exigences et des méthodes pour surveiller la performance des systèmes photovoltaïques. Elle permet aux propriétaires de systèmes photovoltaïques de vérifier si leurs systèmes fonctionnent de manière optimale et si les performances sont conformes aux attentes.

Plusieurs directives européennes sont liées à l'écoconception de systèmes électriques. Le règlement européen relatif à l'écoconception pour les produits liés à l'énergie (Energy-related Product - ErP) est l'un des principaux textes réglementaires pour l'écoconception des produits électriques et électroniques.

Le règlement ErP établit des exigences minimales de performance environnementale pour les produits consommateurs d'énergie tels que les alimentations électriques, les chargeurs ou les onduleurs [2]. Ces exigences portent notamment sur l'efficacité énergétique.

La directive RoHS (Restriction of Hazardous Substances) établit des limites pour les substances dangereuses telles que le plomb, le mercure ou le cadmium dans les équipements électriques et électroniques. Cette directive vise à réduire l'utilisation de ces substances nocives au bénéfice de l'environnement et la santé humaine.

La directive DEEE (Déchets d'équipements électriques et électroniques) établit des normes pour la gestion des déchets d'équipements électriques et électroniques. Elle impose aux fabricants de s'approprier la mise en place des programmes de collecte et de recyclage pour les produits en fin de vie. Cependant ce système n'est pas parfait, en 2020 le taux de collecte des DEEE n'était que 45 % [27].

Le règlement REACH (Enregistrement, Évaluation, Autorisation et Restriction des substances Chimiques) impose des exigences strictes sur l'utilisation de substances chimiques dans la fabrication des systèmes électriques.

Enfin, La directive EcoDesign fixée en 2009 par l'Union Européenne, a pour objectif de réduire les consommations de certaines catégories de produits (produits d'éclairage, appareils de chauffage et refroidissement, etc.) dont les transformateurs HT/BT.

Au-delà des normes et des directives existantes, de nouvelles réglementations environnementales sont en cours de développement pour encourager encore davantage l'écoconception en électronique de puissance.

En résumé, le cadre législatif de l'écoconception de systèmes électriques est réglementé par des normes et des directives. Elles ne sont pour l'instant que très peu spécifiques aux domaines du Génie Électrique comme l'électronique de puissance. Cependant en vue du besoin, de plus en plus de normes et directives devraient émerger dans les années à venir.

#### À retenir

- La réglementation de l'écoconception du Génie Électrique vise à améliorer l'efficacité énergétique, réduire les substances dangereuses, promouvoir la durabilité, établir des critères pour la fin de vie et améliorer la transparence.
- Les acteurs impliqués incluent les organismes de normalisation, les fabricants, les associations professionnelles et les organisations gouvernementales.
- Des normes telles qu'ISO 14006 et des normes spécifiques aux systèmes électriques comme EN 50598 et IEC 62430 sont utilisées pour l'écoconception.
- Les directives européennes telles que ErP, RoHS, DEEE et REACH réglementent l'écoconception des produits électriques.
- De nouvelles réglementations environnementales sont en développement pour encourager l'écoconception en électronique de puissance.

### 3 - Méthode d'ACV appliquée au Génie Électrique, indicateurs

#### 3.1 - Définition

L'ACV est une méthode multicritère qui permet de quantifier les impacts d'un « produit » (qu'il s'agisse d'un bien, d'un service voire d'un procédé), depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à son élimination en fin de vie, en passant par les phases de distribution et d'utilisation, soit « du berceau à la tombe ». La figure 1 illustre ce cycle de vie, sans la partie circularité qui fera l'objet d'une section spécifique.

L'ACV est aujourd'hui définie par les normes internationales ISO 14040 à 14043. La méthode ACV est d'écrite en [3], les différentes étapes sont rappelées ci-dessous et présentées à la figure 1.

- Étape 1 : Définition des objectifs et du champ de l'étude. Cette étape est très importante car elle conditionne tout le reste et surtout les interprétations.
- Étape 2 : Inventaire des flux de matières et énergies associés aux étapes du cycle de vie rapporté à l'unité fonctionnelle retenue. Les flux de matières et d'énergies entrants et sortants à chaque étape du cycle de vie sont inventoriés (inventaire du cycle de vie : ICV).
- Étape 3 : Évaluation des impacts potentiels à partir des flux de matières et énergies recensés. Présentée sous la forme de série de résultats des impacts potentiels (du type « X kg d'équivalents CO2 pour l'effet de serre », « Y kg d'équivalents H+ pour l'acidification », ...).

- Étape 4 : Interprétation des résultats obtenus en fonction des objectifs. Évaluation de la robustesse des résultats.

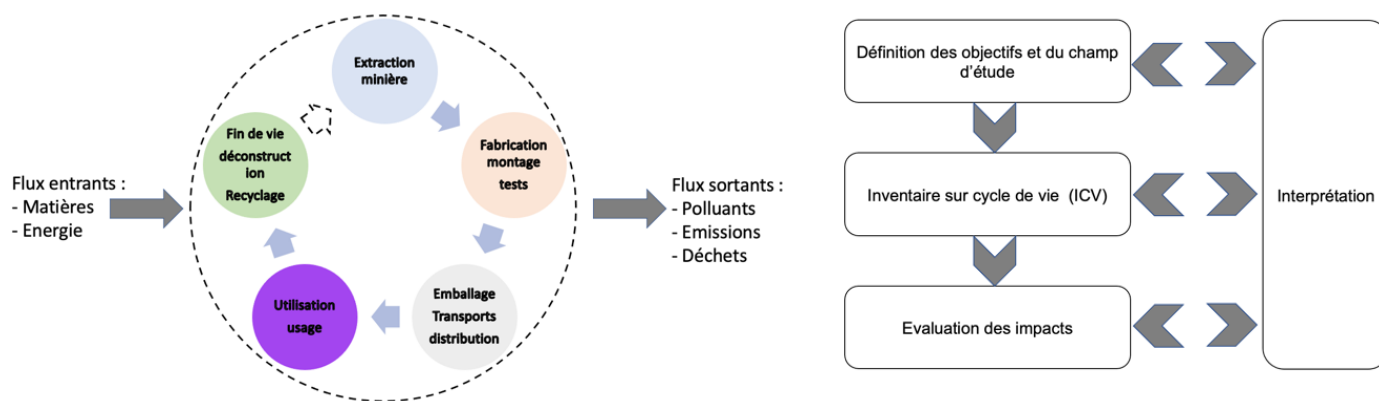


Figure 1 : Illustration du cycle de vie et les étapes d'une ACV

La méthode ACV fait consensus et est applicable à tous les domaines. Elle évite le transfert de pollution, identifie les points faibles et points forts, ainsi que les lacunes de connaissances sur une partie d'un produit. Elle aide à orienter les choix industriels ou publiques.

### 3.2 - Liste des logiciels disponibles

Il existe de nombreux logiciels pour effectuer une ACV, cependant certains semblent présenter plus d'avantages que d'autres pour le secteur du Génie Electrique. Une liste est présentée dans le tableau 3.

Tableau 3 : Liste des principaux logiciels ACV pouvant être utilisés pour des système électriques.

Logiciel ACV	Simapro	Gabi	OpenLCA	Umberto	EcoDesign Studio	Brightway 2	EIME
Gratuit/Payant	Payant	Payant	Gratuit	Payant	Payant	Gratuit	Payant
Compatibilité BdD	Nombreuses	Gabi	Nombreuses	Ecoinvent, Carbon Minds chemicals databases	Base Impact, (option base ecoinvent, données privées)	Nombreuses	CODDE, ecoinvent, Base Impact, PEF/OEF, Negaocet
Collaboratif	Peu, partage des résultats	Non	Oui, plusieurs méthodes de collaboration	Non	Oui	Oui	Non
Incertitude et étude de sensibilité	Analyse de scénario				Analyse de scénario	Analyse de scénario	
	Monte-Carlo			L'équipe d'assistance d'Umberto peut fournir quelques outils basés sur Excel pour permettre l'analyse de sensibilité		Monte-Carlo	
	Matrice Pedigree	Écarts en pourcentage peuvent être utilisés pour les flux d'inventaire.	Matrice Pedigree			Large possibilité d'implémentation grâce à l'utilisation de python	Matrice Pedigree

Remarques	Logiciel d'ACV bien établi et largement utilisé, avec une grande variété de fonctionnalités et de bases de données disponibles.	Une interface utilisateur intuitive, et des fonctionnalités de modélisation avancées.	Open source, gratuit, avec une communauté active de développeurs et d'utilisateurs. Il offre une grande flexibilité pour la modélisation de systèmes complexes.	Une interface utilisateur intuitive et des fonctionnalités avancées pour la modélisation de systèmes complexes.	Ecodesign Studio est conçu pour une ACV simplifiée (l'objectif est de permettre à des non-experts de modéliser correctement un produit).	Open source gratuit, développé pour les besoins spécifiques de l'ACV. Il offre une grande flexibilité pour la modélisation de systèmes complexes, mais nécessite une certaine expérience en modélisation d'ACV et en python.	Les ACV Pep ecopassport (Electric, Electronic and heating & cooling products) sont faits avec.
-----------	---	---	---	---	--	--	--

Il convient de noter que ces logiciels peuvent également être utilisés pour des applications plus générales d'ACV en dehors du Génie Électrique.

### 3.3 - Liste de bases de données

Les Bases de données (BdD) servent à faciliter la création de l'ICV en permettant de ne pas avoir à lister tous les flux élémentaires (directement puisés ou rejetés dans les milieux naturels) entrants et sortants du système étudié. Les BdD définissent des flux complexes (entre les acteurs intervenant dans le système), ce qui représente une agrégation de flux élémentaires. Une BdD adaptée à un secteur inclut des flux complexes appartenant à ce secteur. Par exemple une BdD spécifique au domaine de l'électronique peut proposer le flux complexe de la diode. Comme pour les logiciels, il existe un grand nombre de bases de données. Le tableau 4 en présente certaines en lien avec le Génie Électrique.

Tableau 4 : Liste de BdD pouvant être utilisées pour des systèmes électriques.

BdD	Gratuit/ Payant	Transparence	Adapté au GE	Nombre de flux	Remarques
Ecoinvent <a href="http://Home-ecoinvent">Home - ecoinvent</a>	Payant	Bonne	Electromécanique, électronique, chimie, énergie, etc.	+18000	Complète et permet de modéliser de nombreux processus de production et de consommation. Elle est également transparente quant aux sources de données et aux hypothèses utilisées. Toutefois, elle n'est pas spécifiquement adaptée à l'électronique
Base Empreinte (ADEME) <a href="http://BaseEmpreinte@ademe.fr">Base Empreinte@ (ademe.fr)</a>	Gratuit	Moyenne	Limité	+1600	Pas exhaustive, cependant, elle permet de modéliser de nombreux processus de production et de consommation. Toutefois, elle n'est pas spécifiquement adaptée à l'électronique. C'est la fusion de la Base Carbone® et la Base IMPACTS®
CODDE <a href="http://LCIEDépartementCODDECOncceptionDéveloppementDurableEnvironnement">LCIE Département CODDE COncception Développement Durable Environnement</a>	Liée à EIME	Bonne	Présence d'une BdD sectorielle : électromécanique.	+800	Exclusif au logiciel EIME
ELCD	Gratuit	Bonne	Traitement en fin de	+300	Cette base de données est développée par

<a href="#">Welcome! - (europa.eu)</a>			vie, transporteurs d'énergie, production de matériaux, etc.		l'Union européenne et contient des données pour de nombreux secteurs, y compris le Génie Electrique.
<a href="#">GaBI Product Sustainability (GaBi) Data Search   Sphera</a>	Payant	Oui	Énergies renouvelables, électronique, électricité et TIC, etc.	+15000	La base de données n'est pas spécifique au secteur du Génie Electrique, cependant elle possède un large jeu de donnée dans le domaine.
<a href="#">WEEE LCI Bienvenue sur! - écosystème LCI Database (ecosystem.eco)</a>	Gratuit	Moyenne	Modéliser la fin de vie des équipements électriques et électroniques ménagers et de certains équipements professionnels.	+900	Base de données française d'inventaire du cycle de vie liée à la gestion des équipements électriques et électroniques (EEE) dans le cadre de l'organisation française de la responsabilité des producteurs.
<a href="#">CPM LCA database CPM LCA Database (chalmers.se)</a>	Gratuit	Bonne	Transporteurs d'énergie, technologies ; production de matériaux ; services de transport ; systèmes ; traitement en fin de vie ; Déchets	+500	Base de données en ligne

Pour mieux comprendre, la BdD GaBi est prise en exemple dans le but de décrire comment le secteur du Génie Électrique peut en tirer parti. La BdD présente différents flux complexes liés au Génie Électrique qui sont rangés dans des thématiques spécifiques que l'on appellera fonctions, telles que les diodes, les transistors, les condensateurs, les substrats FR4, etc. Ces mêmes fonctions se déclinent en types, par exemple avec le condensateur, il y a le type aluminium, céramique, tantale, etc. Et pour terminer, on arrive aux flux complexes à utiliser pour l'ACV. La figure 2 présente l'aperçu de l'extension de la base de données « électronique » présente dans le logiciel GaBi. Plus la BdD est complète, plus on pourra être précis dans le choix des composants, sur le type de boîtier, la taille de la puce, la technologie sélectionnée, etc.

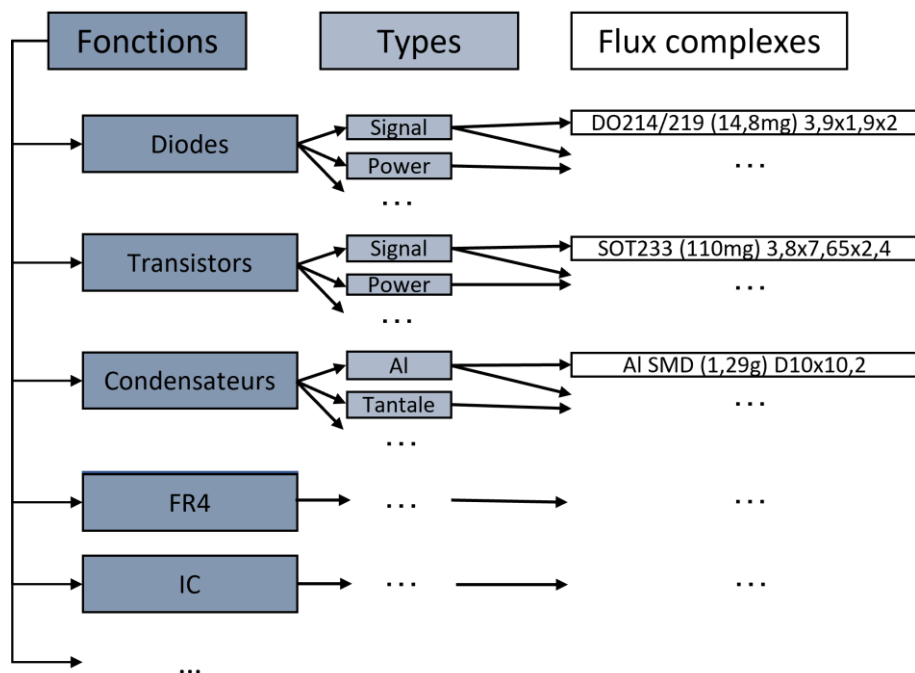


Figure 2 : Aperçu de l'extension de la base de données « électronique » (disponible dans le logiciel GaBi) [4, 5].

Pour décrire plus précisément ce que sont ces flux complexes, la figure 3 représente l'analyse du procédé de fabrication d'un circuit intégré (IC) à l'aide du logiciel GaBi [4]. Il apparaît d'abord que le flux complexe « semi-conducteur » a des entrées, une sortie et des flux en parallèle. Les entrées sont elles aussi d'autres flux complexes qui représentent les besoins nécessaires à la fabrication du circuit intégré. Par exemple avec « wafer » qui cache le procédé pour la fabrication du wafer. Il y a aussi l'utilisation de métaux précieux pour les connexions, le choix du substrat, de la pâte à braser, du boîtier ou de la semelle. À cela se rajoute l'énergie nécessaire à la fabrication du IC. La sortie représente le produit final.

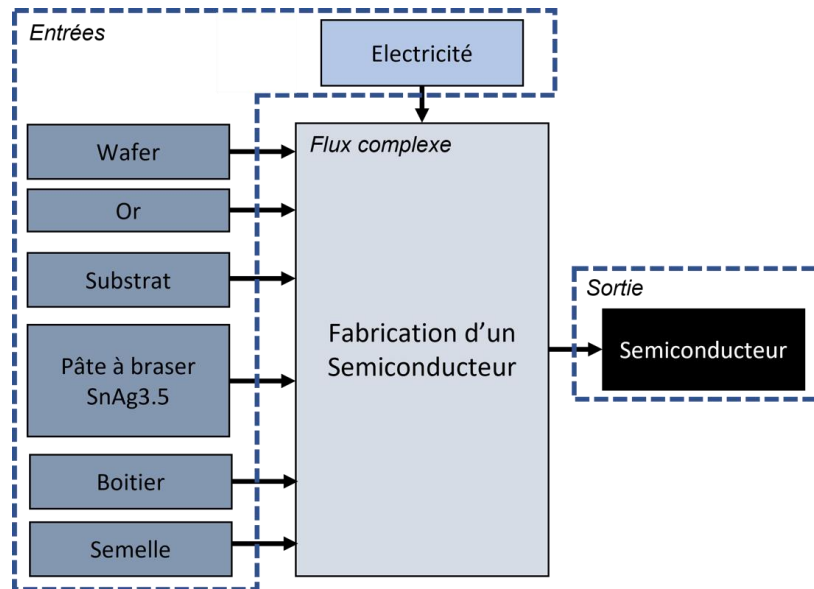


Figure 3 : Conceptualisation du procédé de fabrication d'un circuit intégré à l'aide logiciel GaBi [4].

### 3.4 - Indicateurs et méthode de caractérisation

Après avoir réalisé l'inventaire (ICV), l'étape 3 consiste à évaluer les impacts environnementaux. Il en existe une grande quantité qui peut être classée en deux catégories (représentées à la figure 4) :

- *Midpoint* (impact intermédiaire) : Impact dans la chaîne de causalité.
- *Endpoint* (dommages finaux) : Dommage à la fin de la chaîne de causalité.

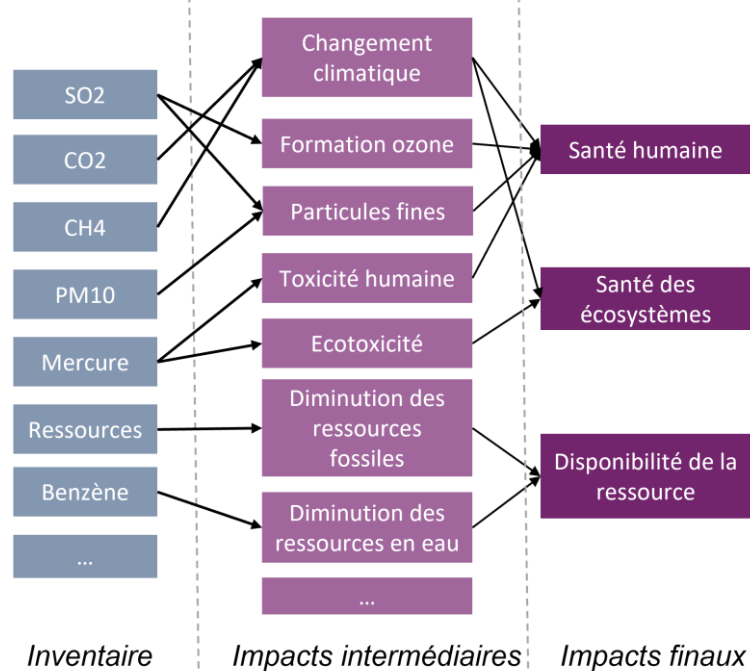


Figure 4 : Catégories d'impacts Midpoint et Endpoint [6].

Les catégories d'impacts sont calculées à partir de méthodes de caractérisation appelées "life cycle impact assessment" (LCIA). Les modèles LCIA peuvent être monocritère (un seul impact environnemental), comme multicritère. L'équation 1 représente le modèle typique d'un impact environnemental pour les méthodes de caractérisation des impacts intermédiaires.

$$SI_i = \sum_s FI_{s,i} \cdot M_s \quad (1)$$

Avec  $SI_i$  le score d'impact intermédiaire pour la catégorie  $i$ ,  $FI_{s,i}$  le facteur de caractérisation intermédiaire qui exprime l'importance relative d'une substance dans le contexte d'une catégorie d'impact intermédiaire  $i$  et  $M_s$  la masse de la substance.

Par exemple pour l'impact sur le changement climatique (pouvoir de réchauffement radiatif à 100 ans, unité de mesure kgCO<sub>2</sub>eq), toutes les substances sont caractérisées pour obtenir des kgCO<sub>2</sub>eq, le facteur de caractérisation du CO<sub>2</sub> est 1, celui du CH<sub>4</sub> est de 21, etc.

Une fois les impacts obtenus, deux étapes peuvent être ajoutées qui sont la normalisation et la pondération. La normalisation est l'étape au cours de laquelle les impacts environnementaux sont multipliés par des facteurs de normalisation afin de calculer l'ampleur de leur contribution aux catégories d'impact et les comparer à une unité de référence. On obtient des résultats adimensionnels et normalisés. Un exemple est donné à la figure 5 [7] : il représente la normalisation des impacts environnementaux par rapport aux limites planétaires d'un onduleur avec une charge de 150 kW, à partir d'une source d'alimentation en courant continu de 450 V, sur une durée de fonctionnement de 10000 heures. L'exemple est détaillé plus précisément au paragraphe 3.5. La normalisation indique que l'épuisement des ressources minérales et métaux est l'impact le plus important par rapport aux limites planétaires.

Dans l'étape de pondération, les résultats normalisés sont multipliés par une série de facteurs de pondération (en %) qui rendent compte de l'importance relative des catégories d'impact.

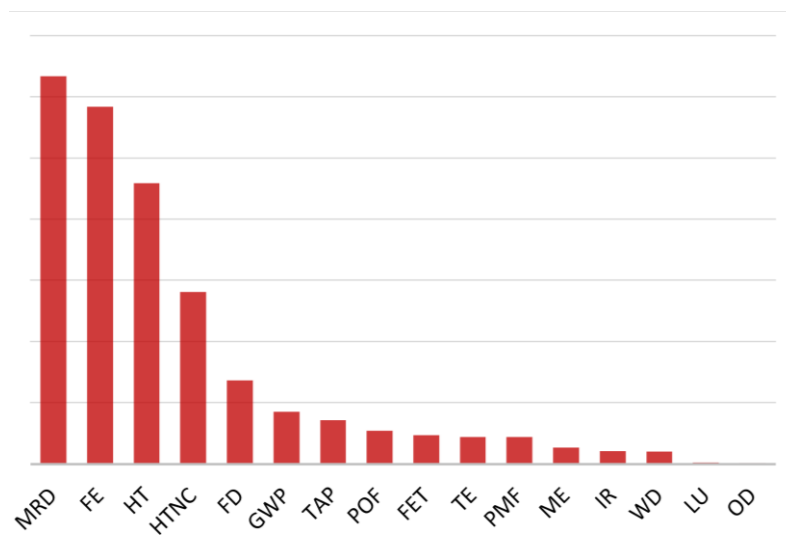


Figure 5 : Hiérarchie des impacts environnementaux avec l'utilisation par rapport aux limites planétaires comme normalisation. Impacts environnementaux calculés pour un point de fonctionnement de l'onduleur avec une charge de 150 kW. Les acronymes sont présentés au tableau 5 [7].

Toutes les méthodes LCIA ne prennent pas en compte tous les flux élémentaires et les éléments du tableau périodique des éléments [8], ce qui peut influencer les impacts environnementaux. Mais aussi les facteurs de pondération des flux élémentaires peuvent évoluer entre les LCIA. Cela amène à des variations d'un impact similaire pour des LCIA différentes [9].

Un choix des catégories d'impacts et des méthodes de caractérisation est à faire par un spécialiste de l'ACV. Cependant, la Commission européenne a présenté une méthode harmonisée de l'empreinte environnementale, le PEF pour "product environmental footprint" [10], afin que tous les acteurs se basent sur les mêmes règles. Le PEF est présenté sous la forme d'un guide et a pour ambition de se décliner par secteur avec le PEFCR (product environmental footprint category rules), un PEF spécifique à une catégorie de produit. Toutes les indications pour effectuer une ACV y sont définies dont les différents impacts environnementaux à étudier (voir tableau 5).

Tableau 5 : Catégorie d'impacts à prendre en compte lors d'une étude PEF [10]

Impacts environnementaux (Midpoint)	Acronyme	Unité	Explication
Changement climatique / Gaz à effet de serre	GWP	KgCO2eq	Le fonctionnement normal de l'effet de serre permet de réguler la température terrestre en retenant une partie de la chaleur émise par la Terre. Cependant, les activités humaines, notamment l'utilisation d'énergies fossiles telles que le pétrole, le gaz et le charbon, perturbent cet équilibre et accentuent l'effet de serre. Le dioxyde de carbone (CO2) est le principal gaz à effet de serre responsable de près des deux tiers des émissions mondiales. C'est pourquoi on utilise souvent l'équivalent CO2 (eqCO2) pour quantifier les émissions de gaz à effet de serre.
Appauvrissement de la couche d'ozone	OD	kg CFC-11eq	La couche d'ozone protège les êtres vivants des rayons ultraviolets (UV) nocifs du soleil. Cependant, les activités humaines ont produit des substances qui appauvrissent cette couche, appelées "substances appauvrissant la couche d'ozone" (SACO) telles que le chlore et le brome. Les chlorofluorocarbures (CFC) sont les SACO les plus couramment produits. En conséquence, cela peut entraîner des brûlures superficielles, des conjonctivites, des cataractes, une augmentation des cancers de la peau et des maladies du système immunitaire. De plus, la réduction de la photosynthèse due à l'appauvrissement de la couche d'ozone peut affecter la qualité et les rendements des cultures ainsi que la chaîne alimentaire aquatique en faisant disparaître le plancton.
Toxicité humaine, cancer	HT	CTUh	Évalue les impacts sur la santé humaine causés par l'exposition chronique à des substances cancérigènes ou non émises dans l'environnement. Estime l'augmentation probable de la morbidité (nombre de personnes malades) pour l'ensemble de la population humaine. (CTU = Comparative toxic units)
Toxicité humaine, autre que cancer	HTNC	CTUh	
Particules	PM	Incidence des maladies	L'émission de particules fines est reconnue comme l'un des facteurs les plus importants contribuant à la mortalité mondiale.
Rayonnement ionisant, santé humaine	IR	kBq U235 eq	Certains éléments chimiques sont instables et peuvent émettre des rayonnements dangereux tels que les rayons alpha, bêta, gamma, X ou neutrons. La mesure de cette activité radioactive se fait en Becquerel (Bq), qui représente le nombre de désintégrations atomiques par seconde.
Formation d'ozone photochimique, santé humaine	POF	Kg COVNMeq	Il s'agit de la formation d'ozone à partir de polluants primaires. L'ozone provoque des effets néfastes sur la santé humaine et sur les végétaux (pollutions estivales). Le COVNM (Composés Organiques Volatils Non Méthaniques) est l'unité de mesure, car le méthane qui est aussi un composé organique volatil à une influence sur l'environnement différente, c.-à-d. effet de serre.
Acidification	TAP	Mole H+ eq	La concentration en ions H+ définit l'acidité : plus la concentration en H+ est forte, plus le pH est faible et plus l'acidité augmente. Cela a un impact direct sur la biodiversité.

Eutrophisation - terrestre	TE	Mole Neq	C'est l'accumulation de nutriment dans un milieu, dû principalement dû au rejet phosphate et nitrate, rejet agricole. Concrètement, l'eutrophisation terrestre favorise par exemple la croissance des espèces dites « mange-lumière » aux dépens d'autres espèces privées, de fait, de lumière.
Eutrophisation, eaux douces	FE	Kg Peq	Trop de nutriment amène à la prolifération de certains végétaux, le plus souvent des algues.
Eutrophisation, marine	ME	Kg Neq	Conséquence : Il n'y a plus d'oxygène dans les milieux aquatiques, les autres espèces meurent.
Écotoxicité, eaux douces	FET	CTUe	Évalue la toxicité de l'émission de substances sur les écosystèmes. Caractérise les risques induits par la présence des composés chimiques dans un système écologique spécifique.
Utilisation des terres	LU	Adimensionnelle (pt), kg production biotique, kg sol, m3 d'eau, m3 d'eaux souterraines	Quantifie l'occupation d'une certaine surface pendant un temps donné ainsi que la variation de la qualité du sol pendant cette occupation.
Consommation d'eau	WD	m3 équivalent monde (m3 world eq)	Quantifie la déplétion des ressources en eau. Peut prendre en compte la précarité de la ressource dans certaines zones géographiques si l'inventaire le permet.
Épuisement des ressources, minéraux et métaux	MRD	Kg Sbeq (masse d'antimoine équivalente)	Quantifie la déplétion des ressources naturelles. Prend en compte la précarité de la ressource.
Épuisement des ressources, matières fossiles	FD	MJ	

### 3.5 - Règles d'or dans les ACV en Génie Électrique

La dernière étape de l'ACV est l'interprétation des résultats, mais d'ores et déjà il existe 5 facteurs dans le domaine du Génie Électrique qui font grimper les impacts environnementaux [4], que voici :

1. L'énergie électrique : la consommation électrique correspondant aux pertes peut être prépondérantes au niveau des impacts devant la fabrication en fonction du type de produit et de son cycle de fonctionnement. Un système avec un mode veille performant et peu de perte est à privilégier.
2. La masse : plus la masse est élevée, plus la consommation d'énergie et de matière lors de la fabrication sont importants.
3. Le volume du PCB : les PCB peuvent être composés de plusieurs couches. Une augmentation du nombre de couches amène à une augmentation du nombre d'étapes de fabrication, d'énergie et de matériaux dont des matériaux parfois précieux comme l'or, voire le facteur n° 5.
4. Le nombre et le type du composant à semi-conducteur : la taille de la puce détermine en grande partie l'impact du composant à semi-conducteur, en raison des opérations à forte intensité énergétique qui se déroulent en amont (*wafer fab*). Les circuits intégrés contiennent de l'or, de l'argent et d'autres métaux précieux, voire le facteur n° 5.

5. Les matériaux précieux : les métaux précieux ont les impacts les plus élevés par masse (produits de base). Plus l'électronique est petite (miniaturisation), plus la pureté et les métaux précieux sont utilisés par rapport à la masse totale de l'électronique.

### Pour aller plus loin ...

L'évaluation environnementale des systèmes électriques est un domaine complexe et en constante évolution, qui pose de nombreux défis pour les chercheurs et les professionnels de l'industrie [11, 12]. L'un des principaux défis est le manque de complétude et l'âge des données disponibles pour l'analyse. Les données doivent être récoltées de manière rigoureuse, ce qui est souvent coûteux et prend du temps. Une façon de pallier cette limite est la prise en compte des incertitudes dans le résultat final à travers une analyse d'incertitude et de sensibilité. De plus, il y a un manque de compatibilité entre les études, ce qui rend difficile la comparaison des résultats. Un autre défi important est la modélisation de l'inventaire, qui nécessite la prise en compte de nombreux paramètres complexes et variables. Aussi il est souvent difficile de critiquer ses propres résultats, ce qui peut entraîner des biais dans l'analyse. Enfin, l'utilisation de deux approches différentes en ACV : Conséquentielle et Attributionnelle. L'objectif de la première approche est de modéliser l'ensemble des impacts environnementaux consécutifs à un changement survenant dans le cycle de vie d'un produit. L'objectif est donc sensiblement différent de celui d'une ACV Attributionnelle qui consiste à étudier le cycle de vie d'un produit.

Malgré ces défis, l'ACV reste un outil essentiel pour évaluer les impacts environnementaux des systèmes électriques et trouver des solutions pour les minimiser.

### À retenir

- L'ACV évalue les impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie, de l'extraction des matières premières à l'élimination en fin de vie.
- Des logiciels ACV, tels que Simapro, Gabi, OpenLCA, sont disponibles, chacun ayant ses avantages et inconvénients pour le Génie Électrique.
- Les bases de données regroupent des flux complexes liés au secteur, comme Ecoinvent, Base Empreinte, CODDE, facilitant ainsi la création de l'inventaire.
- Les impacts environnementaux sont classés en catégories d'impacts midpoint (intermédiaires) et endpoint (finaux), évalués grâce à des méthodes de caractérisation, avec la possibilité d'appliquer la normalisation et la pondération.
- Des règles d'or à destination du concepteur en Génie Électrique permettent de connaître les facteurs aggravant les impacts environnementaux.

## 4 - Écoconception et économie circulaire de systèmes électriques

Les efforts d'écoconception pour les systèmes électriques sont portés sur plusieurs domaines clés, tels que :

- L'efficacité énergétique : Les efforts ont été faits pour maximiser l'efficacité énergétique des produits électroniques de puissance. Les concepteurs cherchent à minimiser les pertes énergétiques structurellement ou en optimisant la gestion du convertisseur.
- Les matériaux : Les matériaux utilisés dans les produits électroniques de puissance peuvent avoir un impact significatif sur l'environnement. Les concepteurs cherchent à utiliser des matériaux recyclables et à réduire l'utilisation de matériaux nocifs pour l'environnement, tels que le plomb, le mercure et le cadmium.

- Les procédés de fabrication/montage/déconstruction : Les procédés de fabrication sont optimisés pour devenir plus durables, en réduisant la consommation d'énergie, en minimisant les déchets générés et en favorisant des pratiques de démontage et de recyclage efficaces.
- Dimensionnement : Les paramètres dimensionnels sont modifiés en lien avec une approche d'éco-optimisation en maximisant des critères issus du cahier des charges fonctionnel et en minimisant des critères environnementaux sur cycle de vie.
- La durée de vie : Les produits électroniques de puissance ont une durée de vie limitée, qui peut avoir un impact important sur l'environnement en fin de vie. Les concepteurs cherchent à prolonger la durée de vie des produits électroniques de puissance et à faciliter le recyclage et la réutilisation des composants électroniques.
- La gestion de la chaleur : Les produits électroniques de puissance génèrent de la chaleur qui peut être nuisible pour les composants électroniques. Les concepteurs cherchent à améliorer la gestion de la chaleur dans les produits électroniques de puissance pour réduire les défaillances et prolonger la durée de vie.
- La réparabilité : Les produits électroniques de puissance sont souvent difficiles à réparer, ce qui peut entraîner une augmentation des déchets électroniques. Les concepteurs cherchent à améliorer la réparabilité des produits électroniques de puissance en concevant des produits modulaires et en utilisant des méthodes de fabrication qui facilitent la réparation.

La figure 6 présente le fonctionnement de l'écoconception de systèmes électriques. Une fois les efforts d'écoconception fournis, il est nécessaire de les quantifier grâce à la méthode ACV afin de vérifier le gain environnemental et les potentiels effets rebonds. L'écoconception consiste en la résolution d'un problème multicritères. Une vision globale est alors indispensable. Par exemple choisir d'améliorer l'efficacité énergétique influencera le dimensionnement et la durée de vie du système. Minimiser les pertes peut se faire avec l'augmentation du niveau de pureté des matériaux utilisés, en augmentant l'intégration, mais cela augmente la consommation de ressources, les efforts à la production, les difficultés de réparation et de recyclage.

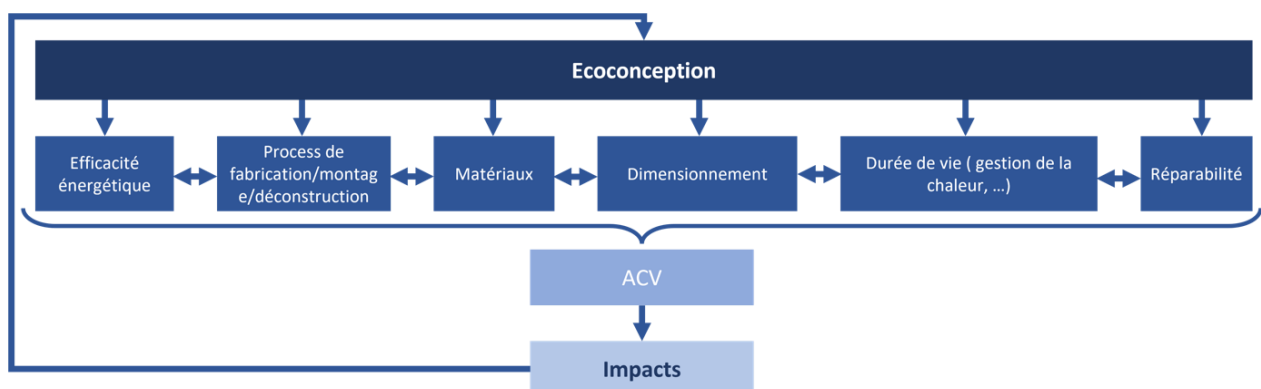


Figure 6 : Principe de l'écoconception des systèmes électriques.

Les initiatives d'écoconception pour les systèmes électriques ont entraîné des améliorations significatives en termes d'efficacité énergétique et de réduction de l'utilisation de matériaux nocifs pour l'environnement. Cependant l'écoconception dans le domaine peut prendre d'autres formes et est aujourd'hui étudiée au niveau des laboratoires pour les systèmes électriques [14], une liste des thématiques est présentée ci-dessous.

- Rendement : pour réduire la consommation et la pollution, il est possible de choisir une topologie de convertisseur adéquate, en optimiser la conception électrique et la commande,

ou encore changer de technologie (par exemple, en optant pour des composants à semiconducteurs à grand gap, SiC ou GaN au lieu du silicium).

- Écofiabilité : ce domaine combine l'optimisation et la fiabilité en se demandant s'il est préférable d'utiliser un composant fiable, mais coûteux en matières premières, ou un composant peu fiable, mais peu coûteux.
- Conception multiusage : cette branche étudie l'économie circulaire, avec notamment des pratiques de revalorisation et de réutilisation (Figure 7). Plus le cercle est petit, plus l'économie circulaire est efficace. La circularité peut être organisée dans l'optique de repenser, de prolonger ou d'optimiser la fin de vie de produit [14, 26].
- Éco-dimensionnement : en jouant sur les paramètres dimensionnels des produits, il est possible d'optimiser les impacts environnementaux. La section suivante présentera un exemple du Génie Électrique.

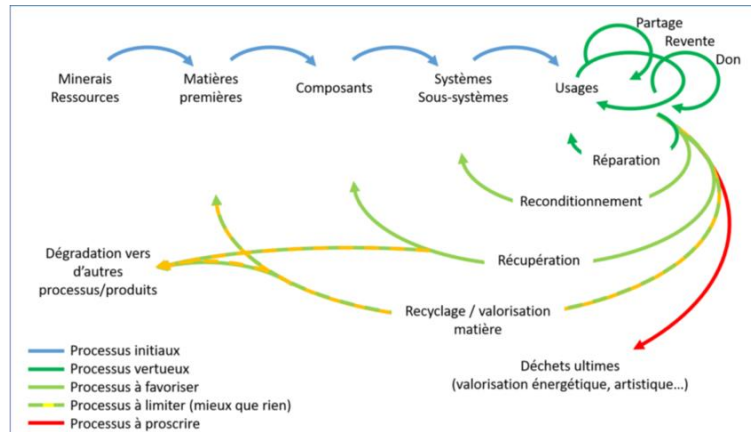


Figure 7 : Cycle de vie d'un système électrique dans une économie classique ou circulaire [20].

Les différents outils d'écoconception qui existent sont présentés dans la référence [20]. Pour la plupart ils sont applicables aux systèmes électriques, ils peuvent être déclinés en quatre catégories :

- Les outils d'évaluation,
- De préconisation,
- De sensibilisation,
- De communication.

### À retenir

- Les efforts d'écoconception visent à maximiser l'efficacité énergétique, réduire l'utilisation de ressources, optimiser les processus de fabrication, prolonger la durée de vie, et favoriser la réparabilité des systèmes électriques.
- L'écoconception nécessite une vision globale et peut aboutir à des compromis, par exemple, entre l'efficacité énergétique et la consommation de ressources.
- Différents outils d'écoconception existent, tels que les outils d'évaluation, de préconisation, de sensibilisation et de communication.
- Le recyclage et la réparation en fin de vie sont des pratiques encourageantes pour réduire l'impact environnemental, mais le recyclage des produits électriques reste complexe en raison de la dispersion des matériaux, de la haute entropie des alliages, et de la dégradation d'usage.
- Pour une économie circulaire efficace, il est essentiel de renforcer les infrastructures de collecte et de traitement des déchets électriques, développer des technologies de recyclage avancées, et intégrer l'écoconception pour optimiser la fin de vie des produits.

## 5 - Exemples d'études

Bien que relativement confidentielle, quelques études ACV de composants du Génie Électrique sont publiées soit par des industriels, soit par des académiques. Un état des lieux spécifique pour l'électronique de puissance est proposé dans une très récente publication [14] par les membres d'un groupe de travail dénommé « Convertisseurs Électroniques de Puissance Plus Soutenables (CEPPS) » du GDR SEEDS

Dans cette section, nous allons illustrer un certain nombre d'études issues de la bibliographie. Nous commencerons par des exemples liés aux matériaux du Génie Électrique puis des exemples relatifs à quelques dispositifs électriques. Les premiers exemples se limitent à la phase de fabrication (hors usage). La phase d'utilisation est liée aux conditions d'utilisation et donc très spécifiques à l'exemple traité, c'est-à-dire peu généralisable.

### 5.1 - Impacts à la fabrication des cartes électroniques et principaux composants

La figure 8 représente les impacts environnementaux liés aux cartes de commande (1 carte de commande rapprochée et 1 carte logique) d'un onduleur de voiture électrique de 150 kW [7]. L'ACV complète d'un l'onduleur IGBT est présentée au paragraphe 5.2. La carte driver a une surface de 150 cm<sup>2</sup> et la carte logique de 70 cm<sup>2</sup>. Le tableau 6 montre les différentes masses totales des sous-parties présentes sur les PCB. D'après la figure 8, pour les différents impacts environnementaux, les circuits intégrés et le matériaux FR4 avec les pistes de cuivre sont les principaux hotspots avec respectivement ≈50% et ≈20% des impacts.

Tableau 6 : Masse totale des différentes composantes des cartes de commande.

	Circuit intégré	Condensateur	Diode, led	Bobine	Résistance	Brasure	Transistor	Transformateur	Connecteurs, Interrupteurs
Masse (g)	10.2	12.8	4.4	0.4	1.3	2.0	1.8	30.0	23.1

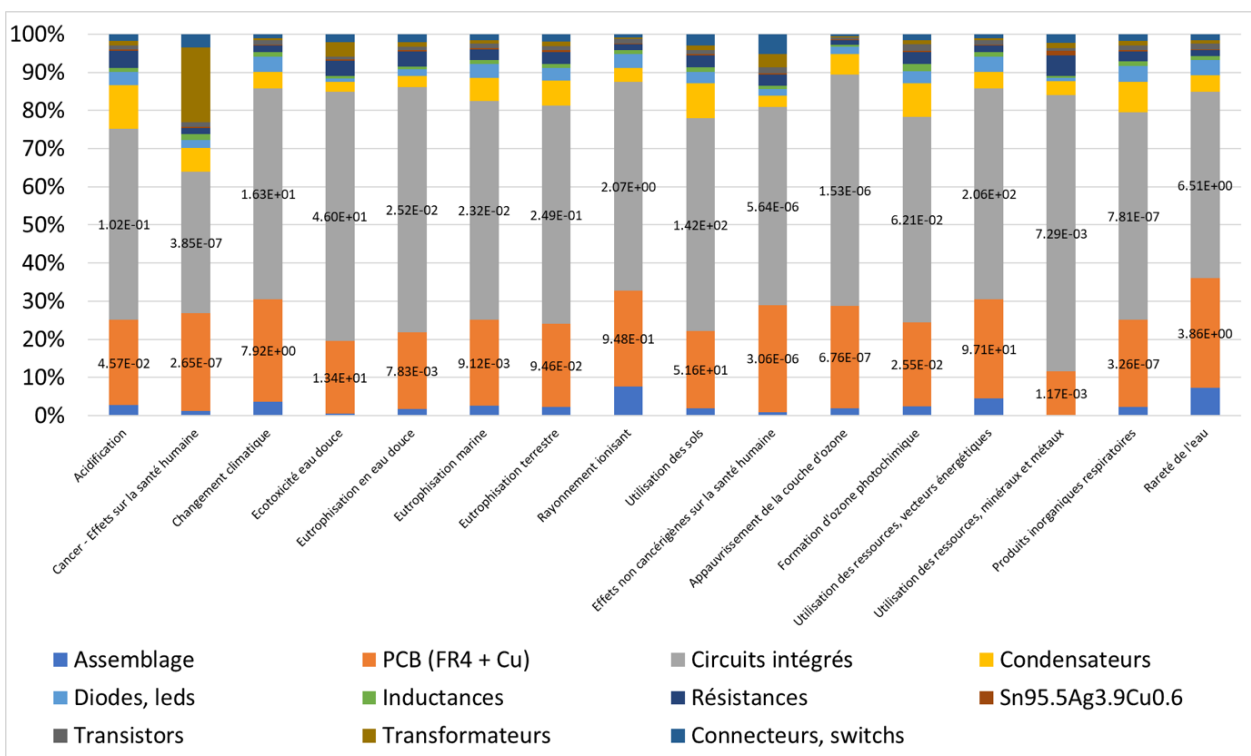


Figure 8 : Impacts environnementaux à la fabrication des cartes de commande pour un onduleur de voiture électrique de 150 kW [7].

## 5.2 - ACV d'un onduleur IGBT pour véhicule électrique

Cette étude issue de [7] présente l'ACV d'un onduleur de véhicule électrique. Cette ACV est réalisée selon plusieurs étapes, précises :

- La première étape consiste en la mise en place du champ d'étude : l'unité fonctionnelle est définie comme suit : un onduleur triphasé AC capable de fournir une puissance de 150 kW (pour une machine électrique), fonctionnant avec une tension continue moyenne de 450 V pendant 15 ans avec 10000 heures de fonctionnement.
- La deuxième étape est la création de l'inventaire sur cycle de vie. Différentes références bibliographiques ont été utilisées afin de construire l'inventaire sur cycle de vie (ICV). On peut citer les principales sources de données provenant de l'Hybrid pack drive [17], qui représente un onduleur formé d'un refroidisseur, d'un module de puissance, d'une capacité de bus et de carte de commande. Des données provenant de l'étude menée par System Plus Consulting (société spécialisée en rétro-ingénierie, basée à Nantes, France) sur le FS820R08A6P2B HybridPACK Drive 750 V IGBT, le module de puissance [18]. Des données *open access* provenant d'un inventaire de mise à l'échelle pour onduleur de véhicule électrique proposé par l'université Chalmers [13].
- La troisième étape sert à l'évaluation des impacts environnementaux. Le logiciel open-source OpenLCA et la base de données Ecoinvent ont été utilisés couplés avec la méthode de caractérisation des impacts proposé par le PEF.

Comme présenté précédemment, il est possible de hiérarchiser les impacts environnementaux grâce à la normalisation. La normalisation par rapport aux limites planétaires est utilisée dans l'étude. Le résultat indique l'épuisement des ressources minérales (MRD) comme le plus important, suivi de l'eutrophisation des eaux douces et les aspects liés à la toxicité humaine, aux cancers et aux maladies non cancéreuses. Le changement climatique est en 6ème position.

La figure 9 présente les impacts environnementaux sur cycle de vie, la fabrication et l'utilisation sont les deux sous-sections qui se distinguent le plus avec les impacts environnementaux les plus élevés. L'épuisement des ressources minérales est largement dominé par la fabrication (environ 94 %), principalement par le module de puissance (environ 43 % de la fabrication totale), pour lequel les contacts électriques et la plaque de base constituent les principales causes (environ 53 % et 31 % du module de puissance, respectivement). Vis-à-vis des autres impacts au niveau de la fabrication, le boîtier en aluminium, la capacité de bus et le busbar peuvent être définis comme éléments dominants (hotspots). Ces résultats permettent d'orienter une action d'écoconception, avec des technologies capables de proposer une évolution des hotspots, tels que des modules de puissance intégrés ou sans semelle. Bien évidemment il faudra vérifier que la solution proposée soit réellement bénéfique. Un autre aspect devra également être considéré. Il s'agit du vieillissement des composants, aussi bien en usage qu'en calendaire [15]. Cet aspect impacte à la fois le remplacement des composants défectueux (surcoût des impacts à la fabrication) mais aussi la technique de diagnostic utilisable (intérêt à la réparabilité).

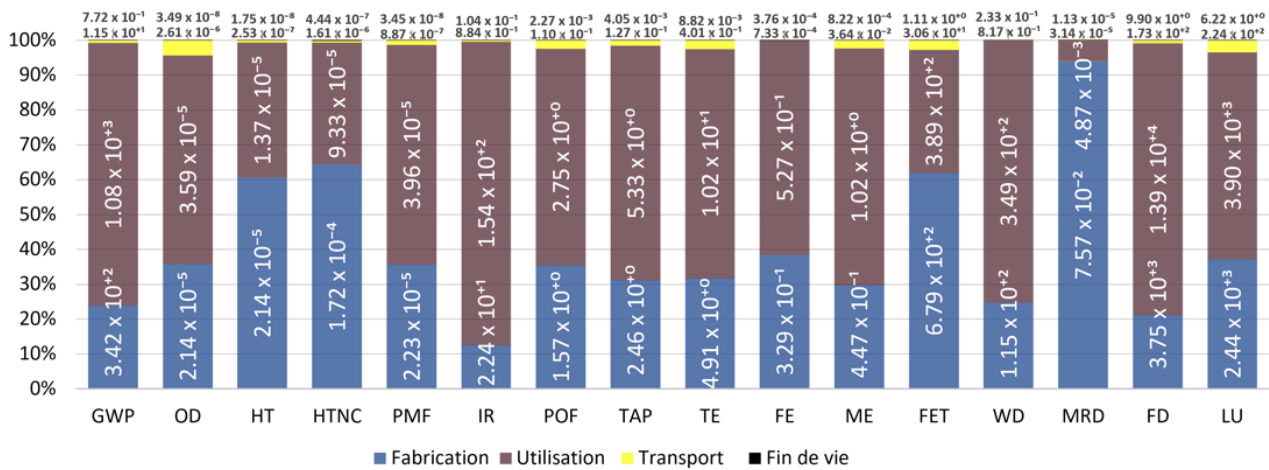


Figure 9 : Impacts environnementaux liés à l'onduleur de 150 kW. Les acronymes sont présentés tableau 5 [7].

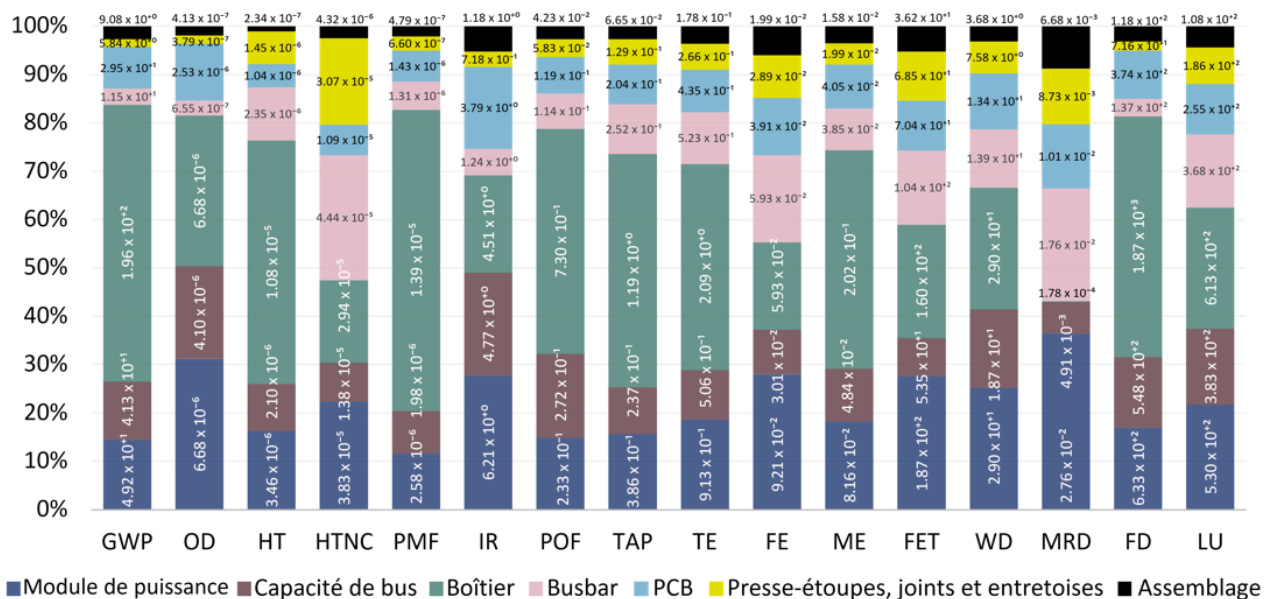


Figure 10 : Impacts environnementaux liés à la fabrication de l'onduleur de 150 kW. Les acronymes sont présentés tableau 5 [7].

### 5.3 - ACV des moteurs électriques à aimants permanents pour VE

Ici, il s'agit d'une étude ACV complète d'un moteur électrique synchrone à aimants permanents (PMSM) pour véhicules électriques [16]. Dans la référence précitée, trois options de moteur électrique ont été comparées dans l'étude : (1) un PMSM équipé d'aimants Nd(Dy)FeB, (2) un PMSM équipé d'aimants SmCo<sub>5</sub>, et (3) un moteur synchrone-réductant (SynRM) assisté par aimants permanents de type céramiques en Sr-ferrite.

Un certain nombre de paramètres de performance ont été maintenus constants entre les solutions comparées : tous les moteurs peuvent fournir et gérer le même décollage (c'est-à-dire la même capacité à fournir un couple pour l'accélération de 0 à 50 km/h en 3,2 à 3,3 s pour toutes les options), la vitesse maximale (145 km/h) et les points de fonctionnement du cycle de conduite choisi pour l'évaluation de l'efficacité énergétique en phase d'utilisation : le "cycle d'essai mondial harmonisé pour la conduite de véhicules utilitaires légers" (WLTC).

Cependant, les machines ont été autorisées à différer en termes de performances d'accélération au-delà de la vitesse de base nominale, et elles présentent des puissances nominales de pointe

légèrement différentes : 100 kW pour le PMSM Nd(Dy)FeB, 97 kW pour le PMSM SmCo<sub>5</sub> et 95 kW pour le SynRM Sr-ferrite assistée par PM.

L'unité fonctionnelle est un kilomètre parcouru. Chaque moteur répondant aux paramètres de performance susmentionnés a été supposé résister à une distance totale de 200 000 km sur le cycle de conduite sélectionné (le WLTC) pendant toute sa durée de vie. Notons que dans cette étude, afin que les résultats soient facilement comparables, l'énergie nécessaire pour la propulsion du véhicule n'est pas intégrée au bilan, seules les pertes énergétiques dans toute la chaîne électrique (y compris l'énergie nécessaire pour transporter sa propre masse en termes de résistance au roulement) sont prises en compte.

Les résultats, obtenus en utilisant la base de données Ecoinvent 3, sont illustrés à la figure 11.

Les phases de production (à l'exception des aimants) et d'utilisation sont modélisées pour deux pays - la Suède et les États-Unis - afin d'illustrer les effets des différentes sources d'approvisionnement en électricité. Les impacts sur le changement climatique et la toxicité humaine se sont avérés les plus importants. La fabrication complète se situe entre 1,7 et 2,0 g d'équivalent CO<sub>2</sub>/km pour toutes les options de motorisation (source électrique : Suède). Le SynRM assisté par des aimants présente le rendement le plus élevé et les émissions de CO<sub>2</sub> les plus faibles. La production de cuivre est importante du point de vue de la toxicité et des effets sur la santé humaine, avec des émissions problématiques lors de l'exploitation minière. Les résultats en matière d'épuisement des ressources divergent en fonction de la méthode d'évaluation. Mais une analyse de sensibilité a montré que d'autres résultats étaient robustes. Les principaux objectifs de conception des moteurs sont identifiés : haute efficacité énergétique, boîtiers minces, enroulements terminaux compacts, laminés segmentés pour réduire les déchets de production, et facilité de démontage.

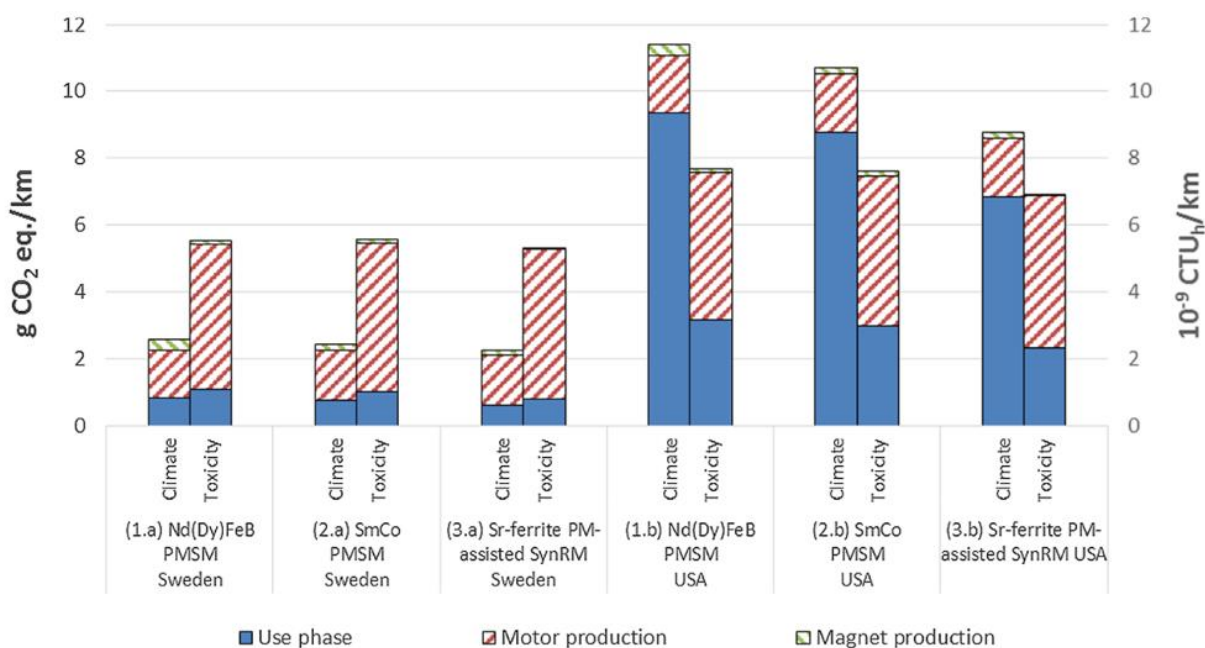


Figure 11 : Impacts (changement climatique et toxicité humaine) liés au véhicule électrique avec différentes motorisations (hors énergie nécessaire à la propulsion du véhicule) [16]

#### 5.4 - ACV de modules Photovoltaïques

Les émissions de dioxyde de carbone sur l'ensemble du cycle de vie correspondent aux émissions causées par la production, le transport ou l'installation de matériaux liés aux systèmes photovoltaïques. Outre les modules eux-mêmes, l'installation typique comprend un câble électrique et un support métallique. Les systèmes photovoltaïques au sol comprennent également une

fondation en béton. Les installations éloignées peuvent nécessiter une infrastructure supplémentaire pour la transmission de l'électricité au réseau électrique local. Outre les matériaux usités précisés à la figure 12, l'analyse du cycle de vie doit prendre en compte le dioxyde de carbone émis par les véhicules lors du transport des modules photovoltaïques entre l'usine, l'entrepôt et le site d'installation.

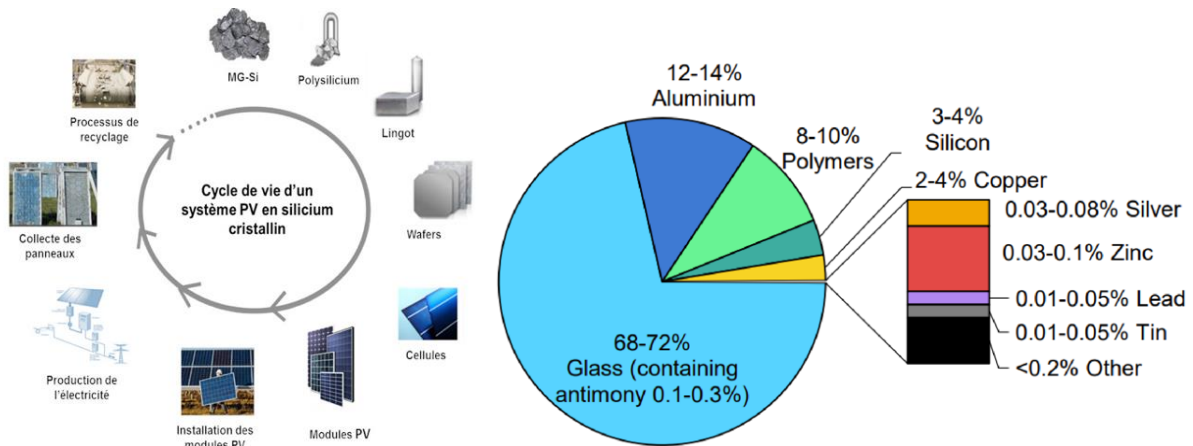


Figure 12 : Cycle de vie d'un panneau PV et répartition en masse des matériaux composant un module PV en silicium [19]

La référence [19] a montré qu'à l'exception des impacts liés à la toxicité humaine, la phase de fabrication correspond à 60% des impacts et la phase d'installation à 40%. De grandes quantités d'énergie et donc des émissions de CO2 sont utilisées pour convertir le sable siliceux en silicium de haute pureté nécessaire à la fabrication des cellules photovoltaïques. L'assemblage des modules photovoltaïques est une autre étape à forte intensité de ressources, avec l'ajout d'un cadre en aluminium à haute teneur énergétique et d'une protection en verre. On estime l'impact CO2 à 420 kqCO2-ég par kWc fabriqué [27].

La figure ci-dessous issue de [47] détaille la contribution normalisée de chaque étape de fabrication (purification du silicium, sa cristallisation, sa découpe en brique, la découpe en wafer, mis en place des cellules, interconnexion et encapsulation des cellules) et d'installation d'un panneaux PV mono-cristallin.

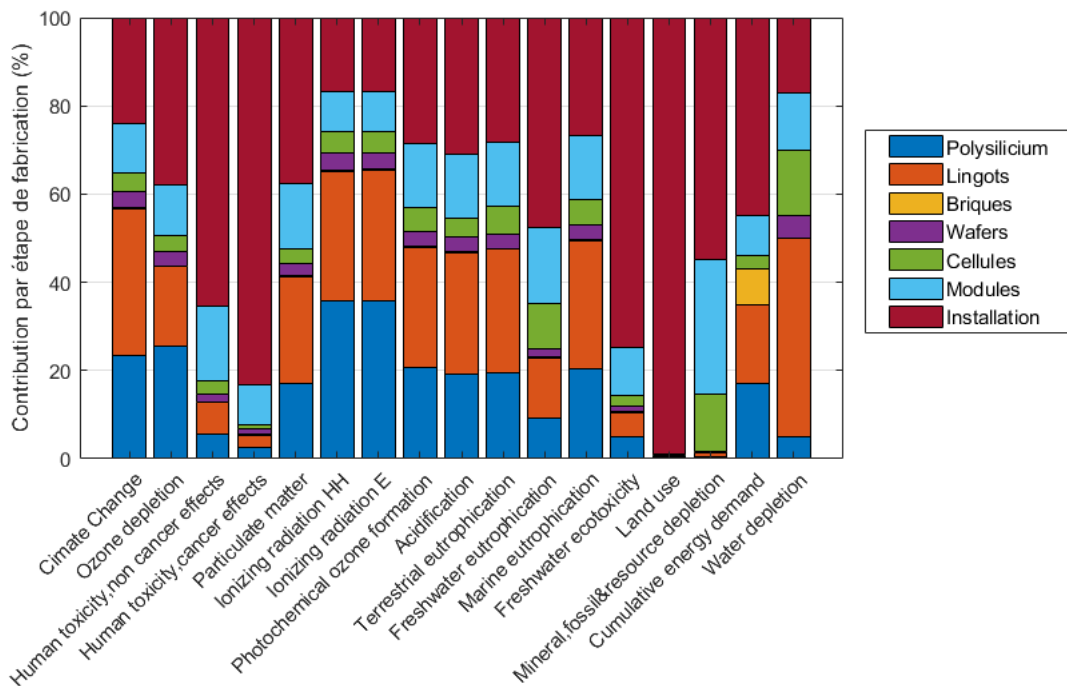


Figure 13 : Contribution des procédés de fabrication dans les impacts environnementaux normalisés du système PV mono-Si monofacial [19]

Signalons enfin que bien que la durée de vie d'un panneau solaire aujourd'hui dépasse les 20 ans, le recyclage des modules photovoltaïques en fin de vie attire l'attention des chercheurs en raison tout d'abord des déchets électroniques engendrés. D'ici la fin de l'année 2050, on prévoit qu'environ 10 % des déchets électroniques seront générés par des modules photovoltaïques dégradés). En raison également des matériaux précieux qu'ils contiennent. Le recyclage des panneaux PV devient alors un enjeu majeur. Ce recyclage est une combinaison de processus chimiques, physiques et thermiques à optimiser afin de minimiser les coûts et les impacts globaux sur l'environnement [28].

## 6 - Conclusion

Tout d'abord, n'oublions pas qu'en Génie Électrique particulièrement, toute manipulation énergétique a des conséquences sur l'environnement (dont nous faisons partie) ! On ne pourra pas éliminer ces conséquences mais il s'agit, dans une pratique écoresponsable, de les réduire au strict minimum pour assurer le service alloué.

Longtemps considérés comme solutions naturelles et évidentes de réduction de nos impacts environnementaux (outils d'efficacité énergétique, dispositifs de développement des énergies renouvelables), les dispositifs du Génie Électrique, particulièrement ceux de grande série, ne sont pas moins sources de pollutions et d'impacts environnementaux. Ils doivent aujourd'hui prendre leur part dans l'effort de réduction de ces impacts au niveau de chaque phase de leur vie.

L'écoconception des systèmes électriques en est à ses prémices, et le travail effectué est aujourd'hui principalement concentré sur la valorisation de matières et sur l'efficacité énergétique. Mais il faut dépasser ce stade en adoptant des stratégies à déployer en amont avec toutes les parties prenantes de la chaîne de valeur [24], telles que :

- Optimisation de la durée de vie : assurer que tous les composants ont une durée de vie similaire et limiter les risques de défaillance.
- Modularité : concevoir des configurations modulaires pour faciliter la maintenance, le recyclage, la réutilisation des fonctions et des matériaux [23].
- Réparabilité : faciliter les réparations en proposant des solutions de diagnostic, des pièces standardisées et une fiabilité accrue.
- Conception pour plusieurs cycles de vie : concevoir des produits qui peuvent être réparés, mis à jour, adaptés, compatibles avec les normes environnementales et les pratiques d'entretien.
- Reconditionnement : reconcevoir les produits pour faciliter le processus de reconditionnement, du démontage à l'inspection, en passant par le nettoyage, le reconditionnement et le réassemblage [26].
- Mise à jour : concevoir des produits pouvant être mis à niveau et réutilisés pour d'autres fonctions ou usages.
- ...

Ces principes de conception écoresponsable visent à créer des produits durables, fiables, adaptatifs et réparables, afin de réduire les déchets et l'impact environnemental lié à la production et à l'élimination des produits.

Notons également l'effet rebond. L'amélioration d'un des impacts environnementaux peut amener à un transfert de pollution en dégradant les autres impacts. C'est pourquoi il est indispensable d'adopter une vision exhaustive des impacts environnementaux, de considérer l'ensemble du cycle de vie et d'anticiper les répercussions potentielles.

D'autre part, il est également important de noter le manque de données notamment liés aux procédés de fabrication de composants électriques. Les bases de données existantes en GE sont à la fois à robustifier mais aussi à compléter. Les industriels et les laboratoires de recherche doivent combiner leurs efforts pour enrichir ces BdD et mettre à disposition des données fiables et complètes. Sans cela, les objectifs d'un Génie Électrique au service de la soutenabilité seraient vains.

Ces thématiques d'écoconception de dispositifs de Génie Électrique constituent donc de formidables opportunités tant académiques (recherche et formation) qu'industrielles. C'est en effet une source riche de créativité et d'innovation dans les concepts, les process de fabrication, de montage et de déconstruction, dans les méthodologies et dans les usages. Cela permet aussi de revisiter nos approches. Par exemple, l'efficacité de fonctionnement et l'intégration sont, jusqu'ici deux objectifs majeurs que la communauté de Génie Électrique s'est donné depuis des décennies. L'approche sur cycle de vie multicritères montre que ces objectifs peuvent être antinomiques par rapport à des objectifs de soutenabilité, le premier menant à une surconsommation de matières premières pures et le second au mieux à une déconstruction difficile, au pire à une aggravation notable des impacts environnementaux.

## 7 - Remerciements

Les auteurs remercient tout d'abord Bernard Multon, ancien professeur à l'ENS Rennes pour avoir initié ces thématiques d'écoconception en Génie Électrique dès les années 2000 au sein de la formation à l'ENS mais aussi au sein du laboratoire SATIE.

Les auteurs remercient également les chercheurs du groupe de travail du GDR SEEDS dénommé « GT Convertisseurs Électroniques de Puissance Plus Soutenables (CEPPS) », animé par J.C. Crébier (G2ELab) et L. Dupont (SATIE) [25], pour les échanges très riches et les réflexions menées autour de l'électronique de puissance soutenable.

## 8 - Glossaire

ACV : Analyse sur cycle de vie

AFNOR : Association Française de Normalisation

BSI : British Standard Institution (Institut anglais de normalisation)

CENELEC : Comité Européen de Normalisation en Électronique et en Électrotechnique

DIN : Deutsches Institut für Normung (Institut allemand de normalisation)

IEC : International Electrotechnical Commission (Commission internationale d'électrotechnique)

ICV : Inventaire sur cycle de vie

ISO : International Organization for Standardisation (Organisation internationale pour la normalisation)

LCIA : Life cycle Impact Assessment (méthode de caractérisation des impacts environnementaux)

DEEE : Déchets d'équipements électriques et électroniques

IE : Impact environnemental

BdD : base de données

GES : Gaz à effet de serre

FEOL : front end of line

BEOL : back end of line

PEF : Product Environmental Footprint

DCB : Direct Bonded Copper substrates

PCB : de l'anglais Printed Circuit Board ou circuit imprimé en français

PBT : polybutylène téréphtalate est un polyester thermoplastique cristallin

PPS : polysulfure de phénylène est un polymère semi-cristallin

## Références :

[1] L. FANG, T. TURKBAY ROMANO, M. RIO, J. MELOT, JC. CREBIER. “L’apport des normes et de la réglementation pour la soutenabilité en électronique de puissance”. SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE, SGE 2023, 5-7 juillet 2023, Lille.

[2] J. HERIBERT “Mise en Application réussie de la directive ErP”. 2014, Eaton, Livre blanc Directive ErP 2009/125/CE

[3] ROUSSEAU, PATRICK., 10 mai 2022, « Analyse du cycle de vie (ACV) Présentation, méthodologie, applications et limites ». Dans : « Chimie verte », [en ligne], Editions T.I. [Paris, France], 2023, g5500, [Consulté le 13/07/2023], TIP142WEB, [base de données en ligne], doi:10.51257/a-v2-g5500, disponible à l'adresse : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/procedes-chimie-bio-agro-th2/chimie-verte-principes-reglementations-et-outils-d-evaluation-42490210/analyse-du-cycle-de-vie-acv-g5500/>

[4] SPHERA. “Electronics in LCA and Life Cycle Thinking of Electronics, Hot Spots and Lessons (to be) Learned”. SICT 2020, Belgique, Sphera. [PowerPoint-Präsentation \(sictdoctoralschool.com\)](#)

[5] HERRMANN, CONSTANTIN & SPIELMANN, MICHAEL. “Methods and Overview on Activities on Carbon Footprints”. Electronic Goes Green 2008, Berlin.

[6] WOLFOVA, M & ESTOKOVA, ADRIANA & ONDOVA, MARCELA & MONOKOVA, A. (2018). Comparing of the external bearing wall using three cultural perspectives in the life cycle impact assessment. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 385. 012064. 10.1088/1757-899X/385/1/012064.

[7] BAUDAIS, B. ; BEN AHMED, H. ; JODIN, G. ; DEGRENNE, N. ; LEFEBVRE, S. Life Cycle Assessment of a 150 kW Electronic Power Inverter. Energies 2023, 16, 2192. <https://doi.org/10.3390/en16052192>

[8] MARILYS PRADEL, JULIEN GARCIA, SAMULI VAIJA. “Guide de bonne pratique de la prise en compte des ressources minérales”. 2019, Réseau EcoSD.

[9] CHEN, XIAOJU & MATTHEWS, H. & GRIFFIN, W. (2021). Uncertainty caused by life cycle impact assessment methods: Case studies in process-based LCI databases. Resources, Conservation and Recycling. 172. 105678. 10.1016/j.resconrec.2021.105678.

[10] ZAMPORI, L., ET PANT, R., Méthode de l’empreinte environnementale de produit (PEF), EUR 29682 FR, Office des publications de l’Union européenne, Luxembourg, 2019, ISBN 97 8-92-76-00653-4, doi : 10.2760/265244, JRC115959

[11] SCHMIDT J, PIZZOL M. “Critical review of four comparative life cycle assessments of printed and electronic communication”. Aalborg, Denmark, 2014.

[12] ERIC MASANET, YUAN CHANG, ANAND R. GOPAL, PETER LARSEN, WILLIAM R. MORROW III, ROGER SATHRE, ARMAN SHEHABI, PEI ZHAI. “Life-Cycle Assessment of Electric Power Systems “. Annual Review of Environment and Resources 2013 38:1, 107-136

[13] NORDELÖF, A., & ALATALO, M. (2017) A Scalable Life Cycle Inventory of an Automotive Power Electronic Inverter Unit. Technical and Methodological Description, version 1.01, Chalmers University of Technology. Disponible à : [http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/DataReferences/LCI%20model%20report%20inverter%20unit%20v1.01\\_Final.pdf](http://cpmdatabase.cpm.chalmers.se/DataReferences/LCI%20model%20report%20inverter%20unit%20v1.01_Final.pdf)

[14] GT CEPPS. État de l’art de la recherche vers une électronique de puissance soutenable. Symposium de Génie Electrique, SGE 2023, 5-7 juillet 2023, Lille.

[15] BAUDAIS, B.; BEN AHMED, H.; JODIN, G.; DEGRENNE, N.; LEFEBVRE. “Influence des modèles de vieillissement sur les impacts environnementaux pour les composants d’électronique de puissance”. Symposium de Génie Electrique (SGE) 2023, Lille.

- [16] ANDERS NORDELÖF, EMMA GRUNDITZ, SONJA LUNDMARK, ANNE-MARIE TILLMAN, MIKAEL ALATALO, TORBJÖRN THIRINGER, Life cycle assessment of permanent magnet electric traction motors, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 67, 2019, Pages 263-274, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.11.004>
- [17] Infineon (2020) HybridKit Drive Quickstart Manual Quick Start Guide for HYBRIDKIT DRIVE
- [18] ELENA BARBARIN, Rapport Infineon FS820R08A6P2B HybridPACK Drive 750V IGBT Module, Nov 2017, version 2, System plus consulting, 21 rue la Noue Bras de Fer 44200 NANTES - FRANCE
- [19] N. GAZBOUR ET AL., “A path to reduce variability of the environmental footprint results of photovoltaic systems,” Journal of Cleaner Production, vol. 197, pp. 1607-1618, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.276.
- [20] BUTEL-BELLINI, Béatrice et JANIN, Marc. Écoconception : état de l'art des outils disponibles. *Techniques de l'ingénieur. L'Entreprise industrielle*, 1999, vol. 4, no G6010, p. G6010. 1-G6010. 12.
- [21] RAHMANI, BOUBAKR & RIO, MAUD & LEMBEYE, YVES & CRÉBIER, JEAN-CHRISTOPHE. (2021). Opportunités de la modularité pour l'écoconception de convertisseurs de puissance. July 2021, 4ème SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE (SGE 2021), Juillet 2021, Nantes
- [22] JORGE MARTINEZ-LEAL. Développement d'outils d'aide à la décision en conception pilotés par l'analyse multicritère de la valorisabilité du produit et l'outillage des lignes directrices d'écoconception pour la fin de vie. Autre [cond-mat.other]. Ecole nationale supérieure d'arts et métiers - ENSAM, 2019. Français. ffNNT : 2019ENAM0062ff. fftel-02939064f
- [23] GDR SEEDS, GT Convertisseurs Electroniques de Puissance Plus Soutenables (CEPPS) <https://seeds.cnrs.fr/gt-convertisseurs-electronique-de-puissance-plus-soutenables/>
- [24] TUGCE TURKBAY ROMANO, LI FANG, MAUD RIO, THECLE ALIX, JULIEN MELOT, FABRICE SERRANO, ALEXANDRE DRAY, PIERRE LEFRANC, YVES LEMBEYE, NICOLAS PERRY, JEAN-CHRISTOPHE CREBIER, « Évaluation de la démontabilité des convertisseurs électroniques de puissance pour une circularité améliorée », Symposium de Génie Electrique (SGE) 2023, Lille, <https://hal.science/hal-04161305>
- [25] AMELIE MÜLLER, LORENZ FRIEDRICH, CHRISTIAN REICHEL, SINA HERCEG, MAX MITTAG, DIRK HOLGER NEUHAUS, “A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory”, Elsevier 2021, <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111277>
- [26] HARISH TRIVEDI, ARUNABH MESHARAM, RAJEEV GUPTA, “Recycling of photovoltaic modules for recovery and repurposing of materials”, [Journal of Environmental Chemical Engineering](https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109501) (IF 7.7) 2023, DOI:10.1016/j.jece.2023.109501
- [27] In Extenso Innovation Croissance, Marion JOVER, Mathilde BORIE. ADEME, Sandrine MORICEAU. Novembre 2021. Équipements électriques et électroniques : données 2020 - Rapport annuel - 105 pages.
- [28] H. BEN AHMED, B. BAUDAIS, and G. JODIN, “Écoconception en génie électrique. Notions fondamentales.” *Technique de l'Ingénieur* mars 2024. <https://doi.org/10.51257/a-v1-d3087>
- [29] H. BEN AHMED, B. BAUDAIS, and G. JODIN, “Écoconception en génie électrique. Exemples.” Mars 2024. *Technique de l'Ingénieur*, <https://doi.org/10.51257/a-v1-d3088>

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