



HAL
open science

L'apport des normes et de la réglementation pour la soutenabilité en électronique de puissance

Li Fang, Tugce Turkbay Romano, Maud Rio, Julien Melot, Jean-Christophe
Crebier

► **To cite this version:**

Li Fang, Tugce Turkbay Romano, Maud Rio, Julien Melot, Jean-Christophe Crebier. L'apport des normes et de la réglementation pour la soutenabilité en électronique de puissance. SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE (SGE 2023), Jul 2023, Lille, France. hal-04163240

HAL Id: hal-04163240

<https://hal.science/hal-04163240>

Submitted on 17 Jul 2023

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

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

L'apport des normes et de la réglementation pour la soutenabilité en électronique de puissance

Li FANG^{a,b,*}, Tugce TURKBAY ROMANO^{a,c,*}, Maud RIO^b, Julien MELOT^d, Jean-Christophe CREBIER^a

^aUniv. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G2ELAB, 38000 Grenoble, France

^bUniv. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, 38000 Grenoble, France

^cArts et Métiers Institut de Technologie, Université de Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, INRAE, I2M Bordeaux, F-33400 Talence, France

^dEaton Industries France, Grenoble 38330 Montbonnot St Martin, France

* Ces auteurs ont contribué également à ce travail.

RÉSUMÉ : Envisager la soutenabilité en Electronique de Puissance (EP) est une activité récente. Pourtant un cadre normatif et réglementaire est déjà existant pour accompagner le concepteur et l'industriel dans cette direction. Cet article présente un état de l'art de la réglementation nationale et européenne au carrefour de la soutenabilité et de l'EP. À ce titre, les différentes normes sont étudiées pour le cadre qu'elles peuvent apporter à l'EP. Sur la base d'une analyse des documents disponibles, les auteurs invitent le lecteur à questionner les compléments qui pourraient être apportés à la réglementation actuelle pour réellement engager les systèmes de conversion en EP vers leur soutenabilité. Ce travail s'inscrit dans les activités menées au sein du projet ANR VIVAE qui réunit industriels et académiques autour de cette ambition commune.

Mots-clés— *Électronique de puissance, soutenabilité, écoconception, économie circulaire, état de l'art, réglementations, normes*

1. CONTEXTE

Le travail présenté dans cet article s'inscrit dans les activités menées au sein du projet ANR VIVAE qui réunit industriels et académiques autour d'une ambition commune, identifier et développer des solutions pour engager l'Électronique de Puissance (EP) vers davantage de soutenabilité [1]. Nous le savons, l'EP est au cœur de la transition énergétique. Elle assure en particulier l'adaptation des grandeurs électriques issues des sources d'énergies renouvelables ou consommées par les diverses charges modernes [2]. De nombreuses normes et réglementations dirigent et régulent le développement, la production et la commercialisation des convertisseurs statiques. Cela va des normes qui encadrent des niveaux de rendements en veille ou en fonctionnement, celles sur la sécurité, la conformité des matériaux ou encore celles relatives aux niveaux CEM conduite et rayonnée. Les concepteurs s'appliquent à respecter cet ensemble de normes qui conditionne la mise sur le marché des produits. S'ajoutant à ces normes plutôt techniques, depuis vingt ans au niveau européen, plusieurs réglementations (règlements et directives) poursuivent l'objectif de réduire les pollutions engendrées par la production, le ou les usages et la gestion de la fin de vie des composants électroniques. Elles ont été mises en place pour limiter ou interdire l'emploi de produits toxiques en EP lors des procédés de fabrication et de composition les convertisseurs statiques notamment. Principalement la directive RoHS, très largement connue, a été initialement adoptée par les pays de l'UE en 2003—*Restriction on Hazardous Substances* (RoHS) [3] et le règlement REACH—

Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals adopté en 2006 [4]. La directive RoHS a significativement eu un impact en EP en interdisant le plomb dans les brasures et soudures des cartes PCB [5]. Pour autant, le cadre réglementaire à l'intersection entre la pratique de l'écoconception, moteur de l'économie circulaire et visant des modèles sociotechniques soutenables à moyen terme est significativement plus important. Dépassant le niveau substance, la directive-cadre sur la gestion des Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques (DEEE) établie en 2002 dans chaque pays membre de l'UE, a suivi des évolutions dix ans après pour faire face à une croissance toujours plus importante des flux à gérer venant des professionnels et des particuliers. Puis la loi n° 2020-105 du 10 février 2020 relative à la lutte contre le gaspillage et pour l'économie circulaire dite "AGEC" a approfondi le cadre de la responsabilité élargie du producteur en France (articles L. 541-10 à L. 541-10-17 et R. 541-86 à R. 541-178 du Code de l'environnement) et a notamment introduit 11 nouvelles filières de traitement de déchets [6]. Au niveau européen, le *New Circular Economy Action Plan* (CEAP) adopté par la Commission Européenne en 2020 définit clairement l'économie circulaire comme l'une des stratégies clés pour soutenir les secteurs industriels à moyen long terme. Pour étendre le champ d'application de la Directive d'écoconception 2009/125/CE [7], qui établit un cadre et fixe plusieurs exigences minimales obligatoires pour les produits liés à l'énergie (ErP)—tels que l'efficacité énergétique—la Commission européenne a publié une proposition de "Réglementation sur l'écoconception pour les produits durables (ESPR)" en mars 2022 [8]. Cette proposition vise à établir des exigences d'écoconception pour promouvoir la durabilité, la réparabilité, la maintenabilité, la réutilisation et le recyclage des *ErP*, qui incluent l'EP.

À présent la réparation et le désassemblage des composants électroniques sont donc progressivement intégrés dans les cahiers des charges des éco-organismes en charge d'organiser la circularité d'une fraction d'équipements électriques et électroniques à tendance croissante. Ainsi, l'EP est concernée par ces dispositifs légaux et il en va de la responsabilité des électroniciens de puissance de faciliter la mise en œuvre de la loi AGEC afin de permettre aux produits d'EP d'être écoconçus, davantage durables dans le temps, réparables, et aux fractions séparables pour être traitées en fin de vie le plus efficacement possible. Développer des technologies et procédés industriels propres à l'EP pour ce traitement ultime en anticipant les impacts environnementaux qui y seront générés, choisir de

revisiter les services rendus par les systèmes conçus pendant leurs usages et anticiper leurs réusages sont autant de sources de créativité stimulantes pour les années à venir.

Il apparaît donc évident que malgré son rôle majeur dans le processus potentiel de « décarbonation » par le vecteur électricité, les choix en EP ont une responsabilité quant à la soutenabilité des infrastructures et composants développés à moyen long terme. Le présent article propose ainsi de décrire et d'analyser le cadre réglementaire et législatif en vigueur en France vis-à-vis de la prise en compte des impacts environnementaux et sociétaux dans la conception et la production des convertisseurs statiques. L'état de l'art a été mené en regard de différents critères jugés utiles aux électroniciens de puissance : chaque étape du cycle de vie à considérer en conception, structure le contenu de l'article. En complément, le travail d'inventaire et de caractérisation de la réglementation en vigueur a été mené vis-à-vis de plusieurs critères tels que : le type de document, l'origine du document, son caractère contraignant pour l'électronicien de puissance, une description succincte de son contenu, et son domaine d'application, les étapes de cycle de vie et les indicateurs d'impacts environnementaux adressés. Afin de mettre à disposition du lecteur l'ensemble des données d'une manière la plus efficace possible, un fichier Excel de synthèse est mis à disposition via le lien disponible du projet de recherche VIVAE [1]. Ce fichier qui reprend l'intégralité de l'inventaire mené pour rédiger cet article, permet de trier et de sélectionner les différents documents en fonction des paramètres jugés utiles pour les acteurs de la chaîne de valeur en EP.

L'originalité de l'analyse proposée dans cet article a vocation à qualifier les limites actuelles du cadrage législatif et normatif pour mettre en évidence les compléments à envisager afin que l'EP soit opérationnelle dans les scénarios de perspectives visant une soutenabilité de nos sociétés à l'horizon 2050. Précisément en France, les auteurs font référence aux scénarios de transition 2050 publiés par l'ADEME « Transition(s) 2050 choisir maintenant agir pour le climat » [9], notamment les scénarios 1 de génération frugale et 2 de coopération territoriale. Ainsi, à l'image des normes en vigueur au niveau CEM conduites et rayonnées, des exigences normatives additionnelles doivent être mises en place pour assurer la prise en compte et la maîtrise des impacts environnementaux générés dans le domaine de l'EP à horizon 2050. En particulier, les notions de seuils, de limites et de classements en fonction de divers aspects tels que la puissance et l'application seront discutées dans cet article.

2. ÉTAT DE L'ART ET L'ANALYSE DE LA RÉGLEMENTATION

Cette première partie propose un état des lieux de la réglementation en vigueur à l'intersection de la soutenabilité et de l'électronique de puissance. Elle est structurée en 4 parties distinctes en fonction de l'étape du cycle de vie concernée, illustrée Figure 1. Seront en particulier listés dans cette section les documents officiels en lien avec la conception et la fabrication des convertisseurs d'électronique de puissance (CEP), leur usage, leurs options de circularité hors recyclage et enfin avec la gestion de la fin de vie, principalement au niveau du recyclage des matières premières.

En se référant au programme de référence visant à déclarer (ou communiquer sur) les impacts environnementaux des produits électroniques et électriques, et de génie climatique (« PEP ecopassport® »), selon la norme ISO 14025 de déclaration environnementale de type III, une quinzaine d'indicateurs d'impacts environnementaux font consensus (à minima) sans pour autant que les experts environnementaux convergent sur une liste définitive qui serait figée [10]. En particulier, il existe des variantes pour certains indicateurs qui

peuvent être appropriés selon les objectifs de l'étude du cycle de vie du produit ou système conçu, afin d'éclairer au mieux les concepteurs d'EP (« Règles de définition des Catégories de Produits ») [11]. Les méthodes associées pour les calculer évoluent elles aussi en fonction des avancées scientifiques. Dans la perspective de la mise en œuvre d'une économie circulaire, le Joint Research Center (JRC) soutient la nécessité de renforcer la réglementation s'appuyant sur le cycle de vie afin de considérer toutes les interactions associées au produit, ses fonctions et services, incluant les chaînes d'approvisionnement» [12]. Ainsi

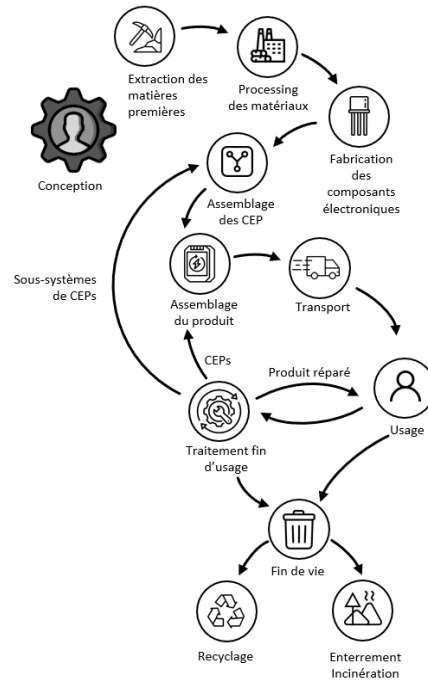


Figure 1 Etapes des cycles de vie des convertisseurs d'électroniques de puissances

la production scientifique du Joint Research Center [13] de la Commission européenne préconise l'usage de certaines méthodes de calcul d'indicateurs d'impacts environnementaux, et publie régulièrement des rapports techniques (ex. : L'International Reference Life Cycle Data System Handbook publié en 2012 [14], ILCD Handbook technical reports [15]), sans règle statique à proprement parler. Il s'agit donc de distinguer les normes permettant la communication et celles soutenant la pratique des (éco-)concepteurs en EP dans le processus de conception. Enfin, et plus localement à l'échelle française, l'indice de réparabilité proposé dans le cadre de la loi AGECE (depuis 2021) a été créé davantage comme un outil de communication à destination de l'acheteur et concerne 9 catégories de produits électroniques [16]. Ses caractéristiques sont étudiées et analysées dans [17] par rapport aux indices également disponibles à l'échelle internationale, principalement européenne et produisant d'autres effets. En France, cet indice de réparabilité a vocation à évoluer vers l'indice de durabilité d'ici 2024 avec l'ajout d'indicateurs de robustesse et de fiabilité.

2.1. La conception soutenable

L'écoconception, ou plutôt la conception soutenable est une approche proactive intégrée dès les phases amonts du processus de conception visant à minimiser les impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie et tendre vers la soutenabilité du produit technique multiphysique. L'écoconception comme démarche d'intégration des aspects environnementaux dans la conception et le développement des produits est précisée dans la norme ISO 14006 : 2020 relative au système de management environnemental [18] et présentée dans cette partie.

2.1.1. État de lieux

Pour assister la mise en œuvre des réglementations en matière d'écoconception, des normes concernées sont classées selon les aspects suivants : *l'intégration de l'écoconception dans le Processus de Développement de Produit (PDP), l'évaluation des performances environnementales* et ce qui a trait à *la déclaration environnementale*.

L'intégration de l'écoconception dans le Processus de Développement de Produit (PDP) vise à intégrer les aspects environnementaux aux côtés des problématiques de conception traditionnelles (performances techniques et coût) [19]. L'intégration des méthodes et outils d'écoconception peut orienter le développement de produits vers la réduction des impacts environnementaux tout au long de leur cycle de vie [18]. Le Tableau 1 liste les normes qui fournissent des lignes directrices pour aider les acteurs à mettre en œuvre une approche d'écoconception dans le PDP.

Tableau 1: Normes concernant la mise en œuvre de l'écoconception dans le Processus de Développement de Produits (PDP) – Système de management environnemental.

Référence	Titre
ISO 14006:2020	Lignes directrices pour intégrer l'écoconception À destination des organismes qui ont mis en place une démarche ISO 14001 sur leur site et souhaitent intégrer la dimension produit.
ISO 14009:2020	Lignes directrices pour intégrer la circularité des matériaux dans la conception et le développement

L'évaluation des performances environnementales permet aux concepteurs de faire des choix motivés et de mettre en place les actions appropriées pour réduire ou prévenir les impacts environnementaux négatifs. L'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est un outil d'analyse systémique normalisé et mature qui fournit une perspective du cycle de vie pour évaluer les impacts potentiels des produits ou services [20]. Les normes présentées dans le Tableau 2 indiquent des lignes directrices pour la réalisation d'une ACV. L'empreinte carbone étant un indicateur d'impact de l'ACV fait l'objet de la norme ISO 14067 spécifique [21].

Tableau 2: Normes concernant l'évaluation de l'impact environnemental.

Référence	Titre
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
ISO 14047:2012	Analyse du cycle de vie - Exemples illustrant l'application de l'ISO 14044 à des situations d'évaluation de l'impact du cycle de vie
ISO 14072:2014	Analyse du cycle de la vie - Exigences et lignes directrices pour l'analyse du cycle de vie organisationnelle
ISO 14067:2018	Empreinte carbone des produits - Exigences et lignes directrices pour la quantification

La déclaration environnementale correspond aux affirmations d'un fabricant concernant les aspects environnementaux d'un produit ou d'un service. Il s'agit, par exemple, d'une déclaration environnementale de type I (certifications d'écolabel conformes à l'ISO 14024), de type II (déclarations qualitatives auto-déclarées conformes à l'ISO 14021, non vérifiées de manière indépendante) ou de type III (déclarations quantitatives auto-déclarées conformes à l'ISO 14025, vérifiées par un tiers qualifié), soit le *Product Environmental Footprint* [22]. La norme EN 50598 est une norme européenne qui spécifie les exigences en matière d'écoconception pour les systèmes d'entraînement électrique, les démarreurs de moteurs, l'électronique de puissance et leurs applications d'entraînement de machine [23]. Fondée sur la

directive d'écoconception (Directive 2009/125/CE), la EN 50598:2015 définit en trois parties les méthodes de test et de mesure pour évaluer la conformité aux classes d'efficacité internationales (classe IE). Les deux premières parties de cette norme ont été annulées et remplacées par les normes internationales IEC 61800-9 sur les entraînements électriques de puissance à vitesse variable [24] et [25] :

Tableau 3: Normes EN50598 : Écoconception des entraînements électriques de puissance, des démarreurs de moteur, de l'électronique de puissance et de leurs applications entraînées.

Référence	Titre
IEC 61800-9-1:2017	Partie 1 : exigences générales pour définir les normes d'efficacité énergétique d'un équipement entraîné via l'approche produit étendu (EPA) et par le modèle semi-analytique (SAM)
IEC 61800-9-2:2017	Partie 2 : indicateurs d'efficacité énergétique pour les entraînements électriques de puissance (PDs) et les démarreurs de moteur
EN 50598-3:2015	Partie 3: Approche quantitative d'écoconception par l'évaluation du cycle de vie, comprenant les règles relatives aux catégories de produits et le contenu des déclarations environnementales

Conformément au processus d'écoconception « classique » la norme nationale EN 50598-3 [23] en vigueur depuis 2015 spécifie les exigences utiles pour les électroniciens de puissance en faisant références aux catégories de produits et contenus des déclarations environnementales relatifs aux Modules d'Entraînement Complets (CDM), aussi appelés variateurs ou onduleurs, utilisés dans les applications entraînement moteur (c'est-à-dire, les charges entraînées par des moteurs) pour les applications basse tension (moins de 1000V) avec des gammes de puissance de 0,12 kW jusqu'à 1000 kW, tout au long de leur cycle de vie complet. Cette norme fournit des lignes directrices pratiques aux concepteurs d'EP pour mettre en œuvre les principes d'écoconception dans leurs activités. Elle commence par décrire les éléments principaux de l'écoconception, y compris deux types de déclaration environnementale (Type II et Type III). Elle définit également les exigences d'écoconception qui mettent en évidence les aspects que les concepteurs d'électronique de puissance doivent prendre en compte, tels que les matériaux constitutifs et les substances utilisées, l'efficacité énergétique pendant la phase d'utilisation et les impacts environnementaux potentiels pendant toutes les étapes du cycle de vie, de la fabrication à la fin de vie. La norme clarifie également les Règles de Catégorisation des Produits (PCR) pour la sélection des catégories d'impact et des indicateurs à qualifier (cf. Tableau 4). Il est à noter que le groupe de travail européen TC22X WG9 est actuellement en cours de mise à jour de la norme EN50598-3 afin d'intégrer l'ensemble de l'électronique de puissance.

Tableau 4: Normes relatives à la déclaration environnementale des produits liés à l'électronique de puissance (EN50598:2015).

Classification des déclarations environnementales	Référence
Déclaration des matériaux	EN 62474:2010
Conformité à la législation applicable	EN 50581:2012
Déclarations concernant les incidences potentielles du cycle de vie des produits	EN ISO 14020:2003
Déclarations qualitatives sur les aspects environnementaux potentiels (pour le type II)	EN ISO 14021:2021
Déclarations quantitatives sur les aspects environnementaux (pour le type III)	EN ISO 14021:2021 EN ISO 14025:2018

2.1.2. Analyse de l'état de l'art

Dans l'EN50598-3, seules la classification des performances d'efficacité énergétique et des pertes de puissance associées—et uniquement pendant la phase d'utilisation—sont déterminées. Également, la norme exige que le fabricant fournisse des informations relatives aux impacts environnementaux potentiels du système en fin de vie, mais sans classer les impacts

environnementaux cruciaux pour l'EP, c'est-à-dire, significatifs dans la détermination de la gravité et des conséquences potentielles des systèmes technologiques associés.

2.2. L'extraction des matières premières et fabrication

2.2.1. État de lieux

L'extraction des matières premières et la fabrication des dispositifs de conversion constituent la première étape du cycle de vie des CEP. À cette étape, des quantités significatives de ressources et d'énergie sont consommées, entraînant des émissions de gaz, de flux chimiques, de particules, dans l'air, le sol et l'eau, ainsi que des pollutions par les déchets produits. L'utilisation de substances toxiques et nocives dans les produits d'EP génère aussi des impacts négatifs à chaque étape de transport (des composants, des systèmes, des déchets, etc.), pendant l'usage (émissions, pièces de rechange, opération de réparation...) et en fin de vie du produit. Lorsque les produits à base d'électronique de puissance sont abandonnés et jetés, les substances toxiques et nocives qu'ils contiennent polluent les sols, l'eau et l'air, mais leurs traitements sont aussi particulièrement polluants comparativement à des systèmes sans électroniques. De nombreuses substances utilisées en électronique et changeant de forme en s'oxydant, se corrodant (etc.) sont connues pour se dissiper et persister dans les écosystèmes. Elles peuvent ainsi s'accumuler dans les chaînes alimentaires des êtres vivants, exposant finalement les êtres humains. C'est le cas pour les chaînes halieutiques par exemple. Mais prévenir la contamination des milieux (incluant la faune, la flore, etc.) vise aussi à ne pas raisonner qu'en termes de pertes de services écosystémiques et dépasse largement les réglementations. Les normes mentionnées dans cet état de l'art pour l'EP sont focalisées sur la limitation de l'utilisation de substances dangereuses (cf. Tableau 5).

Tableau 5 : Normes et réglementations liées aux substances dangereuses

Référence	Titre
RoHS directive (Directive 2002/95/EC)	RoHS (Restriction of Hazardous Substances) Directive
EN 50581:2012	Documentation technique pour l'évaluation des produits électriques et électroniques par rapport à la restriction des substances dangereuses
IEC 63000:2018	Documentation technique pour l'évaluation des produits électriques et électroniques par rapport à la restriction des substances dangereuses
REACH (EC 1907/2006)	REACH (Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals)
IEC 62474:2010	Déclaration de matière pour des produits de et pour l'industrie électrotechnique

Pour limiter l'utilisation de substances dangereuses, certaines ont été interdites (délais progressifs et quantitatifs) et certaines substances de substitutions pour assurer les procédés industriels concernés ou les performances des systèmes conçus ont été proposées. La directive RoHS de l'UE (Directive 2002/95/CE) [3] fixait en 2003 des limites spécifiques pour l'utilisation de six substances dangereuses (plomb, mercure, cadmium, chrome hexavalent, les polybromobiphényles (PBB), les polybromodiphényléthers (PBDE)) dans les produits électroniques et électriques. La version du 8 juin 2011 ajoute quatre nouvelles substances (2011/65/UE), de la famille des retardateurs de flamme halogénés et PCV, et l'amendement 2015/863 quatre substances de phtalates (phtalate de diisobutyle (DIBP), phtalate de bis(2-éthylhexyle) (DEHP), phtalate de benzyle et de butyle (BBP), phtalate de dibutyle (DBP)). Le champ d'application de ces restrictions concerne tous les appareils électroniques, dont les instruments de mesure et ceux utilisés dans le médical, mais présente aussi des exemptions.

Les normes EN 50581:2012 [26] et IEC 63000:2018 [27] réglementent la création de documentations techniques nécessaires à la mise sur le marché de système d'EP pour

prouver la conformité des produits aux exigences de la Directive RoHS. Dans ces deux normes, des méthodes d'essais analytiques et des déclarations de matériaux sont spécifiées. La norme EN 50581:2012 porte uniquement sur la directive RoHS de l'UE, tandis que la norme IEC 63000:2018 vise à aborder différentes réglementations sur les substances dangereuses dans le monde entier pour s'assurer que les fabricants les gèrent de manière similaire (référence aux normes IEC 62476:2010 [28] applicables pour l'évaluation des composants et matériaux dans les produits électrotechniques). De plus, le règlement REACH de l'UE (CE 1907/2006) [4] exige que les entreprises enregistrent, évaluent et autorisent les produits chimiques qu'elles produisent ou importent pour assurer leur utilisation et leur gestion en toute sécurité. REACH (Enregistrement, Évaluation, Autorisation et Restriction des produits Chimiques) est une réglementation de l'UE qui est entrée en vigueur en 2007 [4]. Elle est la principale loi de l'UE pour protéger la santé humaine et l'environnement contre les risques liés aux produits chimiques. La norme IEC 62474:2019 [29] fournit la liste des substances déclarables (DSL) pour les produits électriques et électroniques soumis à REACH de l'UE et des réglementations mondiales. REACH stipule que les substances chimiques qui dépassent 1 tonne par an par entreprise doivent être enregistrées dans une base de données centrale de l'Agence Européenne des produits chimiques (ECHA) [4]. Les substances enregistrées seront évaluées par l'ECHA pour clarifier les risques potentiels. Une autorisation est requise pour les substances extrêmement préoccupantes (SVHC) qui sont incluses dans l'annexe XIV de la réglementation REACH [4]. Le règlement spécifie également des restrictions et des interdictions sur les substances chimiques pour protéger la santé humaine et l'environnement.

Dans le cadre de la directive RoHS, ci-dessous les limites spécifiques pour l'utilisation de six substances dangereuses, et leur présence dans les composants électroniques de puissance [5] :

- (1) Plomb (Pb) (0,1 %) : soudure, revêtements sur les terminaisons des composants, peintures, pigments et siccatifs, PVC en tant que stabilisant, batteries (non couvertes par la directive RoHS).
- (2) Mercure (Hg) (0,1 %) : relais.
- (3) Cadmium (Cd) (100 ppm) : revêtements électroplaqués, soudage spécial (par exemple, dans certains types de flux), contacts, relais et interrupteurs électriques, stabilisant PVC, plastique, pigments céramiques, dans certains matériaux céramiques.
- (4) Chrome hexavalent (CrVI) (0,1 %) : revêtements de passivation sur les métaux, peintures résistantes à la corrosion.
- (5) Polybromobiphényles (PBB) (0,1 %).
- (6) polybromodiphényléthers (PBDE) (1000 ppm) : plastiques.

En pratiques, les entreprises selon leurs tailles, disposent d'un système de gestion des données (type Product Lifecycle Data Management – PLM & PDM) permettant de lier les bases de données fournisseurs (Entreprise Ressource Planning–ERP) avec la composition des systèmes conçus (Bill of Material–BOM) et procédés électrotechniques impliqués, passant en revue les centaines de substances réglementées par REACH et RoHS et de prévenir leurs usages en amont du processus de conception. Ainsi, lorsqu'une substance est détectée, le composant ou procédé qui en est la cause peut être questionné par l'électronicien de puissance qui se devra de générer une solution technique de substitution aux performances, visées par la spécification, similaires ou qui feront l'objet d'un compromis (coût-délais-performances techniques et environnementales). Par exemple, les composants alternatifs conformes à la directive

RoHS qui peuvent être utilisés dans un convertisseur de puissance sont les suivants [5] :

- (1) Les contacts en oxyde d'argent/cadmium peuvent être remplacés par des contacts en oxyde d'argent/étain, avec de bonnes performances à basse tension, bien qu'ils s'usent plus rapidement à haute tension ;
- (2) La passivation au chrome dispose de plusieurs options, dont la plupart sont moins efficaces comme inhibiteurs de corrosion dans les métaux non revêtus ;
- (3) Les commutateurs au mercure peuvent être remplacés par des commutateurs à contacts en or, mais le mercure offre un contact sans fluctuations et une durée de vie opérationnelle significativement plus longue ;
- (4) Les retardateurs de flamme PBDE peuvent être remplacés par d'autres, mais cela pourrait entrer en conflit avec les réglementations sur les incendies.

2.2.2. Analyse de l'état de l'art

Malgré les restrictions imposées par cette réglementation sur la concentration de polluants dans onze catégories onze des catégories de produits spécifiées dans la directive européenne DEEE, aucune contrainte n'est appliquée quant à la quantité totale de polluants utilisés. Cette lacune entraîne une persistance importante de polluants libérés dans l'environnement lors de la production à grande échelle. De plus, l'émergence de nouvelles technologies peut introduire l'utilisation de matériaux innovants dont la toxicité pour l'environnement et l'organisme humain doit être rigoureusement évaluée. Par conséquent, il est nécessaire de mettre à jour la liste des polluants réglementés, qui n'a pas évolué depuis 2011, afin de refléter ces avancées technologiques et de renforcer la protection environnementale et sanitaire.

La substitution amène nécessairement à questionner les performances d'usage, et donne l'opportunité de changer les pratiques de conception en EP.

2.3. L'usage

2.3.1. État de lieux

Augmenter l'efficacité énergétique des convertisseurs de puissance lors de leur utilisation réduira significativement les pertes énergétiques sur des durées d'usage plus ou moins longues, car leur fonction principale est la conversion d'énergie. Ainsi, la directive d'écoconception (Directive 2009/125/CE) [9] établit des exigences minimales seuils obligatoires pour la conception de produits liés à l'énergie (*Energy Using Products-EuP*), en ciblant l'indicateur d'efficacité énergétique. Les produits ne respectant pas ces seuils sont exclus du marché de l'UE, et les moins performants énergétiquement deviennent progressivement les moins compétitifs comme illustré Figure 2. En effet, conformément à la directive 92/75/CEE [30][31], la consommation d'énergie des appareils électroménagers est indiquée par l'étiquetage environnemental, qui ayant évolué au 1^{er} mars 2021 a décalé le référentiel (les classes A+++ ayant évoluée vers du B ou C [32]). Cette « étiquette énergie » présente des informations relatives aux performances fonctionnelles principales par catégorie de produit ayant un effet sur l'efficacité énergétique. Par exemple, pour le lave-linge, sa capacité de linge en kg, la durée du programme, sa classe d'efficacité d'essorage, sa consommation d'eau par cycle en litres, le bruit en décibel généré pour la classe d'essorage, permet de relativiser la performance énergétique aux regards de ces autres consommations (limitées, comme l'eau) pour satisfaire aux fonctions principales attendues (ex. : volume lavé).

En mars 2022, la Commission européenne a proposé un règlement établissant un cadre pour les exigences en matière d'écoconception pour les produits durables (ESPR) [8]. La

proposition ESPR vise à étendre le champ d'application de la directive d'écoconception d'un focus unique sur l'efficacité énergétique en phase d'utilisation à différents aspects de l'efficacité matérielle, tels que la réparabilité, la maintenabilité, et la réutilisabilité du produit [8]. Cette évolution permet de prendre en compte différents scénarios de circularité sans pour autant considérer l'ensemble du cycle de vie du produit.

Tableau 6 : Réglementation concernant l'écoconception de produits liés à l'énergie

Référence	Titre
Directive EuP 2009/125/CE	Établissant un cadre pour la fixation d'exigences en matière d'écoconception applicables aux produits liés à l'énergie (Energy using Product)
92/75/CEE	Concernant l'indication de la consommation des appareils domestiques en énergie et en autres ressources par voie d'étiquetage et d'informations uniformes relatives aux produits
Directive 2010/30/UE9	L'étiquetage énergétique Label 2020 (https://fr.label2020.eu/)
2022/0095 (COD)	Proposition de règlement sur l'écoconception des produits durables

Les fabricants doivent préciser l'efficacité des systèmes d'EP selon la norme EN 50598 (intitulé d'écoconception des entraînements électriques de puissance, des démarreurs de moteur, de l'électronique de puissance et de leurs applications entraînement moteur) [33]. Pour les groupes de produits tels que les alimentations électriques externes, les paramètres soumis aux exigences sont « le rendement moyen en mode actif » et « la consommation électrique hors charge » [34].

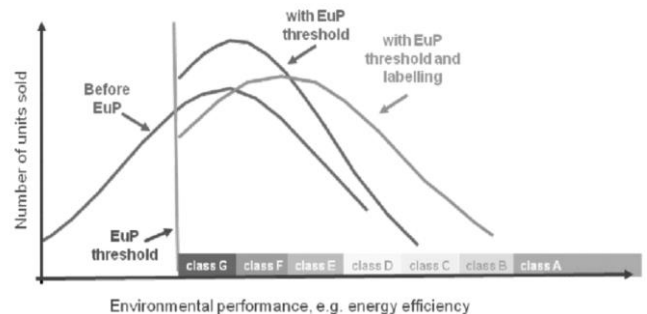


Figure 2 Effets de «push and pull» des normes minimales et de l'étiquetage d'efficacité [35].

Pour motiver les fabricants à concevoir des produits plus performants en termes d'efficacité énergétique, la directive 92/75/CE exige que les étiquettes d'information standard des appareils électroménagers indiquent leur consommation d'énergie et d'autres ressources (de la classe A à G). L'étiquetage de l'efficacité énergétique permet donc aux clients de prendre des décisions éclairées et encourage ainsi la conception de produits ayant une meilleure efficacité énergétique selon Figure 2 [35].

2.3.2. Analyse de l'état de l'art

Cependant, les catégories de produits qui doivent soumis à ces réglementations sont limités, ce qui comprend : écrans électroniques, appareils de réfrigération, sources lumineuses et dispositifs de commande séparés, sources d'alimentation externes, serveurs d'entreprise et produits de stockage de données, transformateurs de puissance de petite, moyenne et grande taille, appareils ménagers de réfrigération, lave-vaisselle ménagers, lave-linge et lave-linge séchant ménagers, moteurs électriques, matériel de soudage, omnibus, sèche-linge domestiques, téléphones portables et des tablettes, appareils de chauffage locaux. Davantage de produits qui utilisent l'énergie devraient être inclus dans les réglementations, tels que les onduleurs pour systèmes photovoltaïques. Par ailleurs, la

réglementation actuelle ne fait pas état du rendement sur cycle de vie. Enfin, les notions d'efficacité énergétiques ne sont pas toujours corrélées avec les conditions d'usage en situation réelle, par exemple en fonction d'un profil de mission. En considérant l'exemple des rendements établis au niveau des onduleurs de panneaux photovoltaïques en fonction des taux d'irradiation est à ce titre intéressant. La réglementation ne prévoit pas encore ce type d'indicateur. Cela s'explique en partie par la diversité des cas d'application, mais c'est un réel manque.

2.4. Réglementation autour de la circularité (hors recyclage)

L'économie circulaire est un cadre économique qui met l'accent sur la réduction des déchets et la maximisation de l'utilisation des ressources grâce à des systèmes en boucle fermée. Le concept de circularité englobe divers scénarios, notamment le refus, la réflexion, la réduction, la réutilisation, la réparation, la rénovation, la refabrication, le reconditionnement, la reconversion, le recyclage et la récupération [36].

2.4.1. État de lieux

La promotion de la circularité des matériels encourage la réintroduction de la valeur résiduelle des matériels dans la chaîne de valeur du produit. Par exemple, le nouveau plan d'action de l'UE pour l'économie circulaire (CEAP) (2020) encourage l'utilisation de matériels secondaires dans la fabrication des produits [37]. Dans le cadre du CEAP, la série de normes EN4555X a été développée pour fournir des normes génériques d'efficacité des matériaux pour l'écoconception dans le mandat de normalisation M/543 [38]. Les normes EN45552-EN45557 se focalisent sur les méthodes d'évaluation de la capacité d'un produit à être utilisé pour une longue durée de vie, réparé, réutilisé, refabriqué, reconditionné et recyclé. La norme EN45558:2019 [39] fournit des lignes directrices pour la déclaration des matières premières critiques, tandis que EN45559:2019 [40] indique la méthode pour fournir des informations relatives aux aspects d'efficacité des matériaux. Le Tableau 7 présente les réglementations et les normes à prendre en compte pour la circularité.

Tableau 7 : Réglementations et normes favorisant la circularité.

Référence	Titre
CEAP (COM/2020/98)	Un nouveau plan d'action pour une économie circulaire Pour une Europe plus propre et plus compétitive
EN 45552:2020	Méthode générale pour l'évaluation de la durabilité des produits liés à l'énergie
EN 45553:2020	Méthode générale pour l'évaluation de la capacité d'un produit lié à l'énergie à être refabriqué
EN 45554:2020	Méthodes générales pour l'évaluation de la capacité de réparation, réutilisation et amélioration des produits liés à l'énergie
EN 45555:2019	Méthodes générales pour l'évaluation de la recyclabilité et de la valorisabilité des produits liés à l'énergie
EN 45556:2019	Méthode générale d'évaluation de la proportion de composants réutilisés dans les produits liés à l'énergie
EN 45557:2020	Méthode générale pour l'évaluation du contenu en matériaux recyclés des produits liés à l'énergie
EN 45558:2019	Méthode générale de déclaration de l'utilisation de matières premières critiques dans les produits liés à l'énergie
EN 45559:2019	Méthode de communication des informations sur l'utilisation rationnelle des matériaux dans les produits liés à l'énergie
IEC/TR 62635	Lignes directrices relatives aux informations sur la fin de vie fournies par les fabricants et les recycleurs et au calcul du taux de recyclabilité des équipements électriques et électroniques
EN 50614:2020	Exigences relatives à la préparation en vue de réutilisation des déchets d'équipements électriques et électroniques
Directive 2002/96/EC	Directive DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques)

Loi AGECE 2021	Loi française Anti-gaspillage pour une économie circulaire (2021-2025)
R2R Directive	Directive sur le droit à la réparation (proposition)

Les exigences d'écoconception permettant d'améliorer la réutilisation, la démontabilité et la récupération des DEEE établies dans la directive Écoconception 2009/125/CE sont intégrées dans la directive DEEE 2012/19/UE [41]. Elles responsabilisent le producteur de l'équipement électronique, les utilisateurs, revendeurs et éco-organismes à participer à une économie du réemploi et de réparation, et de la circularité. Cette directive encourage la réutilisation de l'équipement électronique, soit dans son intégralité, soit en utilisant certaines de ses pièces, afin d'augmenter les niveaux de récupération des DEEE et de minimiser l'élimination ultime. La priorité est donnée à la réutilisation de l'équipement complet, mais si cela n'est pas faisable, d'autres options doivent être envisagées.

La norme EN 50614 :2020 [42] établit des règles pour préparer les DEEE en vue de leur réutilisation de manière « sûre » et « durable », et plus spécifiquement la série EN 4555x fournit un cadre pour améliorer la durabilité des EP, au travers de : l'extension de la durée de vie du produit, la réutilisation de composants de produits, la capacité d'être mis à niveau, l'extraction de composants, les critères de calcul pour le contenu réutilisé ou recyclé, les systèmes de rapport, les critères pour la réutilisation, le recyclage et la récupération.

Le « droit à la réparation » est une proposition de directive annoncée dans le cadre du nouveau programme pour les consommateurs et du plan d'action pour l'économie circulaire de la Commission européenne visant à lutter contre les obstacles qui empêchent les consommateurs d'accéder aux services de réparation ou d'obtenir les informations nécessaires, telles que la disponibilité ou la transparence limitée sur la réparation, afin d'éviter le remplacement du produit.

La loi française anti-gaspillage pour une économie circulaire (AGECE) est structurée en 5 parties couvrant notamment : *l'information aux consommateurs* (modalité de tri, affichage environnemental, GES, garantie légale de conformité des produits), *le réemploi solidaire* (ressourceries), *un plan d'action contre l'obsolescence programmée* (réparation, réutilisation des pièces détachées d'occasion, allongement des garanties de conformités, indice de réparabilité (2021) puis de durabilité (2024), fond de réparation via onze nouvelles filières REP, informations sur la mise à jour des logiciels pour les téléphones et les ordinateurs, réparation unitaire en fabrication additive). Ainsi l'Indice de Réparabilité Français (IRF) [16] évalue sur dix la facilité avec laquelle une catégorie de produit peut être réparée, via sa démontabilité, accès, outils, fixation, la documentation technique relative aux conseils d'utilisation et d'entretien et la disponibilité et les prix des pièces détachées, ainsi que des critères spécifiques par catégories de produits. Chaque sous-critère est affecté d'un coefficient donnant un résultat par critère et un score unique. Un code couleur rouge-orange-jaune-vert clair-vert foncé, vient renforcer la facilité de compréhension du score sur l'étiquette. Il est obligatoire pour cinq produits électroniques et électriques : smartphone, ordinateur portable, lave-linge à hublot, téléviseur et tondeuse à gazon électrique, et donc actuellement pas pour la plupart des convertisseurs d'EP.

La directive DEEE impose à diverses parties prenantes l'obligation de promouvoir l'économie circulaire, d'améliorer la réutilisation, le démantèlement et la récupération des DEEE et de réduire au minimum leur élimination. Les normes telles que les séries EN 50614 : 2020 et EN 4555x sont des lignes directrices volontaires élaborées par des organismes de normalisation. La conformité aux normes est souvent considérée comme une meilleure pratique et peut être adoptée

volontairement par les fabricants, les organisations ou les industries pour démontrer leur engagement en faveur de la durabilité environnementale et de la gestion responsable du cycle de vie des produits.

2.4.2. Analyse de l'état de l'art

Les « méthodes générales pour l'évaluation de la capacité de réparation, réutilisation et amélioration des produits liés à l'énergie » proposées par la norme EN45554 :2020 l'application est limitée aux produits énergétiques uniques tels que les entraînements de l'électronique de puissance [43]. En complément, l'IEC/TR 62635:2012 [44] fournit une méthodologie précise pour calculer les taux de recyclabilité et de récupérabilité des EEE, et donc des convertisseurs d'EP. Elle permet un échange d'informations essentiel entre les fabricants et les recycleurs, facilitant la récupération efficace des matériaux des EEE.

L'introduction de l'IRF vise tout d'abord à communiquer avec l'utilisateur. Par ricochet cela encouragerait les fabricants à tenir compte de la réparabilité dès la conception et des options de réparation à promouvoir dans la vente de l'appareil. Cependant dans le calcul de l'indice, certains critères bloquant toute possibilité de réparation ne sont pas discriminants au point de rendre l'indice « rouge ». D'autre part, le marché étant international, les logiques marchandes ne sont pas réellement influencées par cet indice. Enfin, ce n'est pas un indice qui bloque la vente de systèmes jugés comme dépassant un seuil limite de réparabilité.

Concernant l'indice de réparabilité, il est avant tout conçu pour renseigner le consommateur-acteur. S'il peut être une source de spécifications en vue d'améliorer l'indice, il reste imparfait pour vraiment alimenter une démarche produit réparable. Les critères proposés dans l'indice de réparabilité ne sont pas précisés et adaptés aux différents niveaux de systèmes (composant électronique, assemblages, produits). De plus, les critères proposés se concentrent uniquement sur les aspects de démontabilité mécanique du produit, sans prendre en compte la robustesse du circuit face aux défaillances ni la conception facilitant les diagnostics.

D'ici 2026, la France vise à augmenter la proportion de produits électroniques et électriques réparés de 40 % à 60 %. Ces mesures encouragent finalement une approche plus durable de la consommation et de la production [45].

2.5. La gestion de la fin de vie, recyclage en particulier

Cette section explore les réglementations qui s'appliquent à l'élimination des convertisseurs électroniques de puissance, y compris leurs processus de collecte et de recyclage.

2.5.1. État de lieux

Introduite en 2003, la directive DEEE visait à améliorer la prévention, la réutilisation, le recyclage et la récupération des déchets électroniques en Europe. En 2018, la directive a été révisée pour promouvoir la récupération de matières premières secondaires précieuses issues du recyclage de ces déchets, en assurant une utilisation efficace des ressources gérées [46].

L'un des principaux principes de la directive DEEE est la Responsabilité Élargie des Producteurs (REP), qui oblige les producteurs à participer financièrement à la collecte et au traitement spécifique des DEEE, qui en France passe par les éco-organismes agréés par l'état. Des systèmes électroniques plus facilement réutilisables, réparables et recyclables seront moins chers à traiter, ce qui encourage une écoconception et une approche d'économie circulaire. Le montant de l'écocontribution est déterminé par un barème fixé par chaque éco-organisme et varie en fonction du coût de traitement du

déchet, avec une écomodulation (malus/bonus) pour les produits éco-conçus [47]. Les deux modèles types de financement des opérations de prévention des DEEE en France dans les filières REP à partir de la récolte des écocontributions sont (1) le modèle contributif ou financier, avec une redistribution aux collectivités territoriales ou à d'autres opérateurs ; (2) le modèle opérationnel avec contrat auprès de prestataires. Ainsi, la mise en œuvre de la directive DEEE et des principes de REP varie d'un État membre à l'autre [48].

En France la loi anti-gaspillage pour une économie circulaire (loi AGECE) a déployé sur le territoire 11 nouvelles filières de recyclage à partir de 2021 et d'autres mesures citées précédemment. Pour assurer la gestion responsable et durable des DEEE, la directive DEEE a mandaté le développement de normes pour le traitement des déchets électroniques, dont la norme EN 50625:2014 [49], qui comprend des spécifications pour la collecte et la logistique associées aux DEEE.

Tableau 8: Les réglementations et les normes traitant de la gestion de fin de vie.

Référence	Titre
Directive 2002/96/EC	Directive DEEE (déchets d'équipements électriques et électroniques)
REP (2008/98/CE)	Responsabilité Élargie des Producteurs (25 filières françaises, dont 14 progressivement mise en place depuis 1993)
EN 50625 :2014	Exigences de collecte, logistique et traitement pour les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE)

Les éco-organismes jouent donc un rôle crucial dans la gestion appropriée des convertisseurs d'EP en fin de vie utile. Dans le cadre des systèmes de REP, les producteurs sont tenus de contribuer financièrement à la gestion de leurs produits en fin de vie, plutôt que de compter sur les citoyens pour payer la collecte et la gestion des déchets via les taxes. Les systèmes de REP prennent différentes formes en fonction de la catégorie de produit et du pays, mais impliquent généralement la création d'un organisme responsable de la gestion du système et de la collecte des frais auprès des producteurs. Ces frais sont utilisés pour couvrir les dépenses liées à la collecte, au transport et au traitement des DEEE, y compris les convertisseurs d'EP [50]. De plus, la Loi Anti-gaspillage et Economie Circulaire en France vise à promouvoir la réutilisation des produits en créant un "fonds de réemploi solidaire" qui soutient les organisations et structures telles que les centres de tri, de récupération et de recyclage qui permettent la réutilisation des produits [45]. Les points de collecte des déchets doivent être mis en place de manière à préserver la réutilisabilité des DEEE collectés, ce qui est en partie abordé dans la norme TS 50625-4.

En ce qui concerne les traitements en fin de vie, les convertisseurs d'EP peuvent contenir des composants et des substances qui nécessitent des procédures de traitement ou de récupération spéciales pour éviter les dommages environnementaux. Conformément à la directive DEEE 2012/19/UE, les substances, préparations ou composants suivants doivent être éliminés ou récupérés séparément des autres DEEE :

- Condensateurs contenant des biphényles polychlorés et terphényles polychlorés ;
- Composants contenant du mercure ;
- Piles et accumulateurs ;
- Cartes de circuits imprimés de surface supérieure à 10 cm² ;
- Composants contenant du toner, de l'encre et des liquides ;
- Plastique contenant des retardateurs de flamme bromés ;
- Composants contenant de l'amiante ou des déchets d'amiante ;
- Tubes cathodiques ;

- Composants contenant des CFC, HCFC, HFC et HC ;
- Lampes à décharge de gaz ;
- Câble électrique externe ;
- Composants contenant des fibres céramiques réfractaires ;
- Composants contenant des substances radioactives ;
- Condensateurs électrolytiques de hauteur sup. à 25 mm, de diamètre sup. à 25 mm.

2.5.2. Analyse de l'état de l'art

Les convertisseurs d'EP peuvent contenir certains de ces composants, en particulier des condensateurs, des PCB avec une surface supérieure à 10 cm², des condensateurs électrolytiques et des câbles électriques externes. En fonction de la conception et de l'application, ils peuvent également contenir des batteries au niveau du système. Récupérer ces composants de manière appropriée conformément à la directive-cadre sur les déchets 2008/98/CE [51] est donc obligatoire légalement.

Cependant, il reste une marge d'amélioration pour la mise en œuvre des réglementations adaptées spécifiquement pour les convertisseurs d'EP, notamment en développant davantage de bonnes pratiques de conception entre les concepteurs des convertisseurs (dans toutes leurs diversités) et les éco-organismes qui vont gérer ces flux.

2.6. Synthèses d'Analyse de l'état de l'art réglementaire

L'analyse de l'état de l'art réglementaire applicable au domaine de l'EP fait apparaître plusieurs points singuliers. Tout d'abord, à ce jour, les normes et réglementations *n'exercent aucune contrainte* sur les caractéristiques et « performances environnementales » des dispositifs de conversion de l'énergie au-delà des niveaux de rendement minimum, consommations en veille, etc., tous quasi exclusivement centrés autour de la réduction de l'énergie électrique dissipée au cours de l'usage des dispositifs [7]. Ce critère, véritable « driver » des concepteurs d'EP n'est plus suffisant pour garantir un minimum d'impacts environnementaux à chaque étape du cycle de vie du système d'EP conçu, dans une logique de soutenabilité. En effet, ce critère est lié à l'utilisation des ressources énergétiques primaires pendant la phase d'usage uniquement (indicateur de flux d'inventaire dans l'étape 2 (Analyse de l'inventaire) de l'ACV ISO 14040:2006 [20], qui génère une contribution en termes de CO₂eq. à l'étape 3 (Evaluation des impacts)). En particulier, la quantité de GES (CO₂ eq.) émise dans l'air sera déterminée par la composition du mix électrique dans cette phase d'usage. Une réglementation plus complète sur les émissions de GES et conforme à l'ACV se devrait d'analyser ces émissions au niveau du cycle de vie incluant les impacts sur et en fonction des lieux de production, les transports et la gestion de la fin de vie.

À ce jour, en ce qui concerne les indicateurs des impacts environnementaux, seuls les standards concernant la déclaration environnementale des produits (EN ISO 14020:2003, EN ISO 14021:2021, EN ISO 14025:2018) exigent que les entreprises calculent et rendent publiques les performances environnementales de leurs produits, principalement les émissions de GES sur le cycle de vie du produit. Cependant, il n'y a aucune contrainte sur les limites absolues à ne pas franchir pour chacun des indicateurs (ex. : un seuil d'émissions de GES total à ne pas dépasser sur les phases d'extraction-production-transport avant la phase d'usage), ainsi qu'aucun classement (comparaisons par catégorie) pour les performances environnementales afin d'autoriser leur mise sur le marché ou non.

Le cadrage de la conduite des ACV des systèmes d'EP (objectif et champs de l'étude, ICV, AICV), incluant les calculs

d'impact sur chaque indicateur en vue de comparaison par unité fonctionnelle, n'est pas suffisamment précis pour assurer que les différents acteurs conduiront les estimations de la même manière, hors règles par catégories de produit déjà définies (Product Category Rules). Cela ne permet pas la comparaison des produits entre eux, notamment si l'unité fonctionnelle varie et le choix des indicateurs et des méthodes pour les calculs des indicateurs d'impacts à la discrétion des analystes. Cela peut engendrer des écarts importants de résultats, sans compter le périmètre d'étude et les variations de scénarios de fin de vie. Le groupe de travail international TC111 WG15 travaille actuellement à l'élaboration de la norme IEC 63366 "Product category rules for LCA of electrical and electronic products and systems" afin de mieux cadrer la conduite de l'ACV dans le domaine de l'électrotechnologie.

3. CAHIER DES CHARGES DE LA NORME ENVIRONNEMENTALE IDEALE EN ELECTRONIQUE DE PUISSANCE.

Dans cette dernière partie, faisant suite à l'état de l'art et l'analyse de la réglementation en vigueur sur toutes les étapes du cycle de vie des produits d'électronique de puissance, nous proposons quelques pistes pour faire évoluer les documents et réglementations en faveur d'une électronique de puissance plus soutenable.

3.1. Proposition 1: Limites absolues et système de classement pour les différents indicateurs d'impacts environnementaux

Pour rendre plus contraignantes les normes de performances environnementales calculées sur l'ensemble du cycle de vie du système d'EP, elles devraient évoluer de limites relatives (non contraignantes) en limites absolues (contraignantes), sur un jeu d'indicateurs d'impacts environnementaux significatifs pour l'EP. Ce jeu pourrait être celui qui est déjà présélectionné par la norme EN50598-3 : changement climatique en kg CO₂ eq, Appauvrissement de la couche d'ozone en kg CFC-115, création d'ozone photochimique en kg NMVOC, acidification terrestre en kg SO₂, eutrophisation des eaux douces en kg P, toxicité humaine en kg 1,4-DB, éco-toxicité terrestre en kg 1,4-DB, appauvrissement minéral en kg Fe, épuisement des combustibles fossiles en kg), associé aux bases de données et méthodes de calculs permettant une comparaison. La notion de limites absolues est plus délicate, car elle suppose d'un débat démocratique en amont pour choisir de ce que nous considérons comme une « valeur seuil » à ne pas franchir pour telle ou telle catégorie de produit d'EP, rendant les services fonctionnels à la société (conversion de puissance, support des EnR, communication, etc.). Ces réflexions renvoient aux travaux menés sur « l'Absolute Sustainability » en ACV. Malgré la difficulté de sa mise en œuvre, raisonner en termes de limites physiques au-delà desquelles les écosystèmes Terre basculent dans des zones imprédictibles, ayant des effets d'irréversibilité et d'inertie forte, par exemple, le fait de sortir du couloir des 2°C, maintenant un climat relativement stable sur la dernière période de l'Holocène, permettrait de retirer du marché les produits ayant les plus mauvais niveaux de performances environnementales (en plus de la performance énergétique) et de produire moins de nouveaux produits. Cela générerait une nécessité de réparabilité, réutilisation et bouclage de flux, même dégradés en fin de vie fonctionnelle, dans un territoire donné (ex. : en UE).

Un système de classement d'indicateurs d'impacts prioritaires non centrés uniquement sur les GES, fournirait des orientations aux concepteurs d'EP pour concevoir des produits qui minimiseraient les impacts environnementaux négatifs tout au long de leur cycle de vie, et notamment au niveau des

processus de production, qui sont en (micro)électronique non négligeable [52]. Par conséquent, les futures révisions de la réglementation pourraient inclure un système de classement standardisé pour les indicateurs d'impact environnemental afin de garantir que les concepteurs puissent évaluer et améliorer les performances environnementales de leurs produits de façon efficace tout au long du processus de conception. Cela pourrait se faire en déplaçant les « quotas » alloués par produit mis sur le marché entre phases de production et celle de l'usage incluant la maintenance-réparation, puis du recyclage.

Reprenant les difficultés de l'affichage environnemental, il serait impossible de faire une comparaison entre les différents produits sans se baser sur la même unité fonctionnelle. Un autre obstacle significatif est qu'il manque les standards qui peuvent être utilisés pour définir une limite absolue pour les indicateurs d'impacts environnementaux pour chaque catégorie du produit. La limite absolue est issue du cadre des limites planétaires [53]. Sur la base de ce cadre, Bjørn et al. (2015) ont développé des limites pour les indicateurs d'ACV fondés sur la capacité de charge des écosystèmes [54]. Reprenant l'exemple de maintenir la température moyenne à la surface de la Terre inférieure à 2°C, les émissions de GES devraient être inférieures à 985 kg de CO₂eq par personne et par an [54]. Pour passer de cette limite globale à une catégorie de produit à travers les limites du secteur industriel, différents principes d'échelle doivent être examinés, avec au cœur de ces réflexions cette unité fonctionnelle. Ici encore, la notion de valeur fonctionnelle par unité de système en usage semble nécessaire à la gestion circulaire soutenable des systèmes d'EP sur un territoire donné.

3.2. Proposition 2 : Établir la déclinaison de catégorie de produit de la série de normes EN4555x

La famille de normes EN4555x présente des méthodes et des critères génériques pour l'évaluation de la durabilité des produits liés à l'énergie : la capacité des EuP (Energy-using Products) à être réparés, réutilisés, améliorés, remanufacturés, recyclés et récupérés. Cependant, Patra (2021) a souligné le manque d'application de ces normes horizontales génériques EN4555x à des produits énergétiques uniques tels que les entraînements moteurs [43], associés à des lignes directrices d'écoconception trop générales. L'application spécifique des critères de circularité des normes EN4555x aux EP nécessite une spécification (qualification) et une adaptation supplémentaire pour être intégrée dans les exigences de conception d'EP (par niveau systémique).

3.3. Proposition 3: Imposer un indice de durabilités (intégrant la réparabilité) sur chaque produit

L'affichage d'un indice de durabilité incluant la réparabilité et des valeurs seuils (go/no-go) sur un produit permet à l'utilisateur de développer son esprit critique et de demander des informations sur l'expertise requise pour réparer un produit et le type d'outils nécessaires. Ces informations peuvent aider les utilisateurs à prendre des décisions éclairées quant à la réparation du produit lui-même ou à la recherche de services de réparation professionnels. Un produit non réparable techniquement ou par manque d'organisation de filière de REP pourrait être retiré du marché. Il resterait à traiter l'ensemble des systèmes actuellement non réparables, dysfonctionnels, stockés dans la société (chez les particuliers, organisations, déchèteries, etc.). Traiter ces gisements existants, comme l'héritage de notre société à l'instant t nécessite des fonds et générera des impacts environnementaux importants. Tenir les

accords de Paris visant une neutralité carbone en 2050 demande cette anticipation.

Également, si l'indice de réparabilité peut être un élément à optimiser dans le cahier des charges du concepteur d'EP, il n'est pas vraiment adapté pour accompagner le concepteur. Un jeu d'indicateurs, plus techniques et plus spécifiques permettraient aux concepteurs d'inclure dans leurs processus de conception des éléments structurants en écoconception. À l'image des règlements et normes sur les performances énergétiques, des critères techniques en lien avec la soutenabilité et la circularité pourraient être définis, suggérés puis imposés par la réglementation.

3.4. Proposition 4 : Imposer des mesures de démontabilité sur le produit

La gestion en fin de vie de l'EP nécessite d'établir une méthode d'évaluation normalisée pour le désassemblage des convertisseurs d'EP pour trier, limiter l'hétérogénéité des matériaux à récupérer et maximiser la recyclabilité de certains types de flux. Le désassemblage des EP est un processus complexe et long qui exige des connaissances, des outils et des compétences spécialisés. Ainsi, une méthode normalisée d'évaluation de l'effort nécessaire au désassemblage par type de produit d'EP serait nécessaire dans différents scénarios de fin de vie, tels que la réparation, la refabrication ou la récupération de matériaux et de composants de valeur maximale avec un minimum d'effort. Cette évaluation est nécessaire à l'établissement de contrat de traitement des DEEE dans les filières REP. Un retour systématique d'évaluation pratique de la durabilité (incluant la réparabilité) des catégories de produits ferait évoluer ces méthodes et les niveaux d'exigence attendues. Des gammes de désassemblage type pourraient être par exemple établies et partagées entre concepteurs, usagers, réparateurs et éco-organismes selon les scénarios.

3.5. Proposition 5 : Indice normalisé de réparabilité : un cadre pour évaluer et améliorer la réparabilité des convertisseurs électroniques de puissance

Afin de fournir aux parties prenantes un cadre potentiel pour évaluer la réparabilité du produit, il est nécessaire de développer un indice normalisé de réparabilité pour les convertisseurs électroniques de puissance. Cet indice serait composé de différentes catégories et critères, qui pourraient être évalués et pondérés afin de calculer un score potentiel de réparabilité. Ces catégories pourraient inclure des facteurs tels que la robustesse face aux pannes, la documentation et l'identification du produit, les diagnostics, la réparation, le remplacement des pièces/composants et la requalification. En tenant compte d'aspects tels que la présence potentielle de composants de sécurité, la facilité de diagnostic, la disponibilité de la documentation, la modularité, la normalisation des composants et l'accessibilité des pièces, cet indice hypothétique chercherait à permettre aux parties prenantes de prendre potentiellement des décisions plus éclairées concernant la réparation et la maintenance. De plus, l'indice pourrait potentiellement tenir compte de facteurs tels que la durée potentielle des procédures, la complexité du retrait des composants, la disponibilité des services de réparation et la compatibilité avec d'autres produits. La mise en œuvre d'un tel indice normalisé de réparabilité pourrait potentiellement contribuer à la transparence, faciliter les réparations et encourager la conception de convertisseurs électroniques de puissance plus réparables et durables.

3.6. Proposition 6: Imposer des règles de conception de circularité dans le produit.

Pour promouvoir la conception durable des convertisseurs d'EP, il est essentiel de considérer l'ensemble du cycle de vie, y compris leur traitement en fin de vie. Au stade de la conception,

les convertisseurs d'EP doivent être conçus en intégrant les scénarios « R » assurant que leur valeur ajoutée puisse être récupérée et prolongée. Par conséquent, l'élaboration de normes pour la conception des CEP (des directives de conception sur mesure pour l'EP) est cruciale pour soutenir et guider les concepteurs dans la création de produits durables. Ces normes devraient couvrir les aspects clés de la conception de produits, tels que la réutilisation, la maintenance, la réparation, la remise à neuf, le recyclage, le désassemblage et la modularité. Ces normes peuvent promouvoir la minimisation des déchets, réduire l'impact environnemental et soutenir l'économie circulaire, où les ressources précieuses sont préservées et utilisées aussi longtemps que possible. Elles devraient être associées à des indicateurs de circularité incluant des seuils de commercialisation pour retirer du marché les produits dont les indicateurs de circularité seraient trop faibles.

3.7. Proposition 7: Imposer une standardisation pour minimiser l'hétérogénéité entre les dispositifs EP

Les niveaux élevés des différents types d'hétérogénéité dans les produits d'EP, tels que les variations dans l'architecture, la technologie, la taille, l'emballage, les composants, les connecteurs et les matériaux, constituent des obstacles importants pour atteindre les objectifs de circularité. Le manque de standardisation peut rendre difficile le développement de systèmes ou de solutions circulaires pouvant être appliquées à ces produits. Par conséquent, la promotion de la standardisation et de la cohérence grâce à des lignes directrices et des normes communes pour la conception des EP est cruciale pour permettre et faciliter les scénarios de circularité à moyen long terme.

4. CONCLUSION

Le présent article visait à offrir à la communauté scientifique pour le domaine électronique de puissance et plus largement génie électrique, un état des lieux le plus complet possible au niveau de réglementation liée à l'écoconception et l'économie circulaire en France, et par ricochet en Europe. Cet état des lieux, mené en regard des étapes du cycle de vie, peut être appréhendé selon de nouveaux critères, tout en étant critique dans la perspective de disposer d'une réglementation largement en faveur de la soutenabilité en EP. Les propositions formulées pour renforcer la réglementation en ce sens nécessitent une meilleure coopération entre les acteurs de la chaîne de valeur des produits d'EP.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Agence nationale de la recherche (ANR) pour son soutien financier, numéro de subvention ANR-21-CE10-0010.

5. RÉFÉRENCES

- [1] Site internet projet ANR VIVAE , <https://g2elab.grenoble-inp.fr/fr/recherche/projet-anr-vivae>
- [2] S. Peyghami and F. Blaabjerg, "Demands for Bridging Power Electronics and Power System Engineering Concepts," in *2020 5th IEEE Workshop on the Electronic Grid (eGRID)*, Aachen, Germany: IEEE, Nov. 2020, pp. 1–8. doi: 10.1109/eGRID48559.2020.9330663.
- [3] RoHS Directive. https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/rohs-directive_en (accessed May 22, 2023).
- [4] Regulation (EC) No 1907/2006 of the European Parliament and of the Council of 18 December 2006 concerning the Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH), establishing a European Chemicals Agency, amending Directive 1999/45/EC and repealing Council Regulation (EEC) No 793/93 and Commission Regulation (EC) No 1488/94 as well as Council Directive 76/769/EEC and Commission Directives 91/155/EEC, 93/67/EEC, 93/105/EC and 2000/21/EC, vol. 396. 2006.
- [5] F. Javier Hurtado Albir and J. Antonio Carrasco Hernández, "Environmental Aspects of Manufacturing and Disposal of Power Electronics Equipment," *EPE Journal*, vol. 21, no. 3, pp. 5–13, Sep. 2011, doi: 10.1080/09398368.2011.11463798.
- [6] "A French act of law against waste and for a circular economy," *European Circular Economy Stakeholder Platform*, Feb. 27, 2020.
- [7] Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for energy-related products (Text with EEA relevance), vol. 285. 2009.
- [8] "Proposal for Ecodesign for Sustainable Products Regulation." https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-ecodesign-sustainable-products-regulation_en (accessed May 22, 2023).
- [9] "Prospective - Transitions 2050 - Résumé exécutif," *La librairie ADEME*.
- [10] <http://www.pep-ecopassport.org/fr/> (accessed May 26, 2023).
- [11] "PCR du programme PEP ecopassport® (ed 4)." <http://www.pep-ecopassport.org/fr/creer-un-pep/faire-une-acv/> (accessed May 26, 2023).
- [12] https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/green-and-circular-economy_en (accessed May 22, 2023).
- [13] "EU Science Hub homepage," May 22, 2023. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/index_en (accessed May 22, 2023).
- [14] European Commission. Joint Research Centre., *The International reference Life Cycle Data system (ILCD) handbook: towards more sustainable production and consumption for a resource efficient Europe*. LU: Publications Office, 2012. Accessed: May 22, 2023. [Online]. Available: <https://data.europa.eu/doi/10.2788/85727>
- [15] "Environmental Footprint: New chemical toxicity indicators." https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/environmental-footprint-new-chemical-toxicity-indicators-2019-04-05_en (accessed May 22, 2023).
- [16] <https://www.ecologie.gouv.fr/indice-reparabilite>." (accessed May 22, 2023).
- [17] "EN 45554. General Methods for the Assessment of the Ability to Repair, Reuse and Upgrade Energy-Related Products; European Committee for Electrotechnical Standardization: Brussels, Belgium, 2021."
- [18] "ISO14006:2020," *ISO*. <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/07/26/72644.html> (accessed Jun. 20, 2022).
- [19] G. Johansson, "Success factors for integration of ecodesign in product development: A review of state of the art," *Environmental Management and Health*, vol. 13, pp. 98–107, Mar. 2002, doi: 10.1108/09566160210417868.
- [20] "ISO 14040:2006" <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14040:ed-2:v1:en> (accessed May 22, 2023).
- [21] "ISO14067:2018," <https://www.iso.org/fr/standard/71206.html> (accessed May 26, 2023).
- [22] <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/EnvironmentalFootprint.html> (accessed May 22, 2023).
- [23] "NF EN 50598-3," *Afnor EDITIONS*. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-505983/ecoconception-des-entrainements-electriques-de-puissance-des-demarreurs-de-fa184643/45227> (accessed May 22, 2023).
- [24] "IEC 61800-9-1:2017 | IEC Webstore | pump, motor, water management, smart city." <https://webstore.iec.ch/publication/28620> (accessed May 22, 2023).
- [25] "IEC 61800-9-2:2017 | pump, motor, water management, smart city." <https://webstore.iec.ch/publication/31527> (accessed May 22, 2023).
- [26] "NF EN 50581," <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-50581/documentation-technique-pour-levaluation-des-produits-electriques-et-electr/fa180411/40561> (accessed May 26, 2023).
- [27] "NF EN IEC 63000," <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-iec-63000/documentation-technique-pour-levaluation-des-produits-electriques-et-electr/fa186069/82255C>
- [28] "IEC TR 62476:2010" <https://webstore.iec.ch/publication/7079> (accessed May 22, 2023).
- [29] "NF EN IEC 62474," <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-iec-62474/declaration-de-matiere-pour-des-produits-de-et-pour-industrie-electrotechn/fa191665/82557> (accessed May 22, 2023).
- [30] Directive 92/75/CEE du Conseil, du 22 septembre 1992, concernant l'indication de la consommation des appareils domestiques en énergie et en autres ressources par voie d'étiquetage et d'informations uniformes relatives aux produits, vol. 297. 1992.
- [31] "Étiquette-énergie," *Wikipédia*. Sep. 19, 2022. <https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=%C3%89tiquette-%C3%A9nergie&oldid=197084423> (accessed May 22, 2023).
- [32] "Une nouvelle étiquette énergie pour l'équipement de la maison," <https://www.gouvernement.fr/actualite/une-nouvelle-etiquette-energie-pour-l-equipement-de-la-maison> (accessed May 22, 2023).
- [33] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/ALL/?uri=celex%3A32009L0125> (accessed May 22, 2023).
- [34] Commission Regulation (EU) 2019/1782 of 1 October 2019 laying down ecodesign requirements for external power supplies pursuant to Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council and repealing Commission Regulation (EC) No 278/2009 (Text with EEA relevance).
- [35] K. Schischke, N. F. Nissen, and L. Stobbe, "Energy efficiency meets ecodesign — technology impacts of the European EuP directive," in *2008*

- IEEE International Symposium on Electronics and the Environment*, May 2008, pp. 1–6. doi: 10.1109/ISEE.2008.4562882.
- [36] J. Potting, M. Hekkert, E. Worrell, and A. Hanemaaijer, “Circular economy: measuring innovation in the product chain,” *Planbureau voor de Leefomgeving*, no. 2544, 2017.
- [37] *Communication from the commission to the european parliament, the council, the european economic and social committee and the committee of the regions A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe*. 2020.
- [38] A. M. Bundgaard and R. D. Huulgaard, “The role of standards in support of material efficiency requirements under the Ecodesign Directive,” *Journal of Cleaner Production*, vol. 385, p. 135599, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.135599.
- [39] “NF EN 45558,” *Afnor EDITIONS*. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-45558/methode-generale-de-declaration-de-lutilisation-de-matieres-premier-criti/fa192411/82669> (accessed May 22, 2023).
- [40] “NF EN 45559,” *Afnor EDITIONS*. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-45559/methode-de-communication-des-informations-sur-lutilisation-rationnelle-des/fa192412/82668> (accessed May 26, 2023).
- [41] *Directive 2012/19/UE du Parlement européen et du Conseil du 4 juillet 2012 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE) Texte présentant de l'intérêt pour l'EEE*, vol. 197. 2012.
- [42] “NF EN 50614,” *Afnor EDITIONS*. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-50614/exigences-relatives-a-la-preparation-en-vue-de-reutilisation-des-dechets-de/fa186234/84907> (accessed May 26, 2023).
- [43] M. Patra, “European Ecodesign Material Efficiency Standardization Overview for Circular Economy Aspects in Motor and Power Drive Systems,” in *Energy Efficiency in Motor Systems*, 2021, pp. 231–242. doi: 10.1007/978-3-030-69799-0_18.[44] “IEC TR 62635:2012” <https://webstore.iec.ch/publication/7292> (accessed May 26, 2023).
- [45] “M. Ellen MacArthur Foundation, ‘France’s Anti-waste and Circular Economy Law,’ ellenmacarthurfoundation.org, 2021.
- [46] A. Bundgaard, A. Remmen, and J. Jensen, *Designing out Waste*. 2018.
- [47] Ecologic, “Note technique OCAD3E sur les critères d'écoconception,” <https://www.ecologic-france.com/ecologic/nos-publications/note-technique-ocad3e-sur-les-criteres-deco-conception.html> (accessed May 29, 2023).
- [48] “Gestion et traitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE).” <https://www.economie.gouv.fr/cedef/dechets-equipements-electriques-electroniques-deee> (accessed May 29, 2023).
- [49] “NF EN 50625-1,” *Afnor EDITIONS*. <https://www.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/nf-en-506251/exigences-de-collecte-logistique-et-traitement-pour-les-dechets-dequipement/fa178147/43769> (accessed May 26, 2023).
- [50] L. Domingo and D. Melchor, “Designing out waste: which levelers for local authorities?,” *Procedia CIRP*, vol. 105, pp. 535–540, 2022.
- [51] “Directive n° 2008/98/CE du 19/11/08 relative aux déchets et abrogeant certaines directives.” <https://aida.ineris.fr/reglementation/directive-ndeg-200898ce-191108-relative-dechets-abrogeant-certaines-directives> (accessed May 26, 2023).
- [52] T. Pirson, T. P. Delhay, A. G. Pip, G. Le Brun, J.-P. Raskin, and D. Bol, “The Environmental Footprint of IC Production: Review, Analysis, and Lessons From Historical Trends,” *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, vol. 36, no. 1, pp. 56–67, Feb. 2023, doi: 10.1109/TSM.2022.3228311.
- [53] L. Persson *et al.*, “Outside the Safe Operating Space of the Planetary Boundary for Novel Entities,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 56, no. 3, pp. 1510–1521, Feb. 2022, doi: 10.1021/acs.est.1c04158.
- [54] A. Bjørn and M. Z. Hauschild, “Introducing carrying capacity-based normalisation in LCA: framework and development of references at midpoint level,” *Int J Life Cycle Assess*, vol. 20, no. 7, pp. 1005–1018, Jul. 2015, doi: 10.1007/s11367-015-0899-2.