

Soutenabilité et électronique de puissance : vers une approche interdisciplinaire

Gaëtan HELLER^{1,†}, Lucas RIONDET^{1,2}, Florentin SALOMEZ¹, Silvio CLEMENT^{1,2}, Pierre LEFRANC¹, Jean-Christophe CREBIER¹

¹Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP*, G2Elab,
38000 Grenoble, France

²Univ. Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, G-SCOP, 38000 Grenoble, France

* Institute of Engineering Univ. Grenoble Alpes

[†] Correspondance : gaetan.heller@g2elab.grenoble-inp.fr

RESUME – L'électronique de puissance (EP) profite d'une dynamique liée à l'électrification de nos sociétés. Cette dynamique, qualifiée de « transition énergétique », s'accompagne toutefois de potentiels transferts d'impacts environnementaux (IE) qui pourraient entraver l'atteinte de la soutenabilité de nos sociétés modernes. Cet article propose de positionner les notions fondamentales de circularité, d'éco-conception et de soutenabilité dans le contexte de l'EP. Il vise à comprendre la position que semble adopter la communauté de l'EP concernant la soutenabilité et à critiquer cette position au regard d'éléments apportés par d'autres champs disciplinaires. En effet, l'écoconception et l'économie circulaire sont des notions qui ont fait l'objet de critiques, en raison des limites que peuvent présenter ces approches vis-à-vis des enjeux de la soutenabilité. Pour poursuivre nos objectifs de réduction des IE tout en intégrant des aspects jusqu'alors non pris en compte dans notre réflexion, une ouverture vers l'interdisciplinarité et la pensée holistique pourrait être une voie de recherche à initier.

Mots-clés—*Electronique de Puissance, Circularité, Soutenabilité, Impacts Environnementaux, Eco-conception, Limites Planétaires.*

1. INTRODUCTION

Au sein des sciences du génie électrique, les enjeux environnementaux ont majoritairement été abordés par le prisme de la transition énergétique. Dans la communauté de l'EP, cela s'est traduit par une recherche axée sur l'optimisation du rendement énergétique, de la densité de puissance et de la réduction des coûts des convertisseurs d'électronique de puissance (CEP). Depuis quelques années, de nouvelles approches de conception ont vu le jour, portant sur la prise en compte de l'ensemble du cycle de vie des convertisseurs. Le nombre des publications en lien avec l'évaluation et la conception en vue de la réduction des IE (c-à-d l'écoconception) augmente chaque année, supportée par l'adoption en conception en EP de nouveaux outils, de nouvelles méthodologies et de nouvelles pratiques, comme l'analyse de cycle de vie. Certaines de ces méthodologies et outils ont été développés dans le champ de l'ingénierie (ex : génie mécanique, génie industriel, génie chimique) pour évaluer et réduire les IE de leurs systèmes d'étude respectif. De fait, les outils et concepts que nous commençons à utiliser dans notre milieu ont déjà été éprouvés ailleurs. Si notre objectif réel est la réduction des IE, nous pouvons nous intéresser aux critiques émises dans les autres

champs disciplinaires afin de développer dès à présent des directions de recherche pertinentes en vue de la diminution forte des IE et voire même de la soutenabilité.

Le présent article propose tout d'abord de définir le concept de soutenabilité ainsi que les concepts sous-jacents liés à la conception dans ce cadre, puis de présenter notre positionnement à son égard (Cf section 2). La section 3 présente une analyse des axes de recherche actuels et des pratiques émergentes dans la communauté de l'EP dans le cadre de la soutenabilité. La section 4 identifie certaines limites des approches dont le milieu de l'EP s'est emparé pour répondre aux enjeux de réduction des IE. Enfin, nous proposerons des pistes de recherche pour appréhender et traiter les problématiques susceptibles de faire émerger des nouvelles pratiques dans la communauté de l'EP.

2. CADRE THEORIQUE DE LA SOUTENABILITE

En 1987, la Commission Mondiale sur l'Environnement et le Développement, une commission de l'Organisation des Nations Unies, publie le rapport « Our Common Future », plus connu sous le nom de rapport Brundtland. Ce rapport tente de définir un cadre dans lequel nos sociétés doivent s'inscrire pour répondre aux grands enjeux de l'époque, dont les enjeux environnementaux. Ce cadre est celui du développement durable, une notion désormais bien connue, définie en ces termes dans le rapport : « *un mode de développement qui répond aux besoins des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs.* » [1]. Des critiques et des interrogations ont depuis été formulées, en raison du caractère vague de cette définition quant à la posture à adopter vis-à-vis de l'environnement. En particulier, dans le champ disciplinaire de l'économie, deux approches ont été définies : La soutenabilité dite *faible* et la soutenabilité dite *forte*. La définition du *développement durable* s'inscrit dans la soutenabilité *faible*. En effet, la soutenabilité *faible* se définit par la transmission d'un stock global de capitaux au moins équivalent d'une génération à une autre [2]. Ce stock global comprend le capital humain, définie comme l'ensemble des connaissances et des savoir-faire, les capitaux manufacturés (produits, infrastructures, systèmes de production, etc.) et le capital naturel, définie comme l'ensemble des ressources naturelles et des services rendus par les systèmes biophysiques [2]. La notion de soutenabilité *faible* suppose que les différents types de capitaux peuvent être substitués sans conditions. La

baisse du capital naturel peut donc être compensée par l'augmentation d'un autre type de capital. Toutefois, un pan de la recherche en économie remet en cause cette hypothèse de substituabilité et propose une autre vision, dite de *soutenabilité forte*. La *soutenabilité forte* suppose qu'il n'existe pas de substituabilité possible entre le capital naturel et les autres [2]. Ces formes de capitaux non substituables sont qualifiées de capitaux naturels critiques, et fournissent des services que les autres formes de capitaux ne pourraient pas fournir, comme par exemple la protection de la couche d'ozone contre les rayonnements néfastes. Cette notion de capitaux naturels critiques fait pleinement écho aux cadres des *limites planétaires* [3]. Ce cadre définit un espace sûr pour l'humanité par rapport aux systèmes biophysiques qui constituent le système Terre. Il s'agit plus précisément des seuils de perturbation que ces systèmes biophysiques peuvent supporter avant de basculer dans un état instable et imprévisible. En 2023, l'actualisation de ce cadre identifiait que six des neuf limites planétaires ont été franchies, démontrant alors la non soutenabilité de nos sociétés, au sens de la *soutenabilité forte* [4].

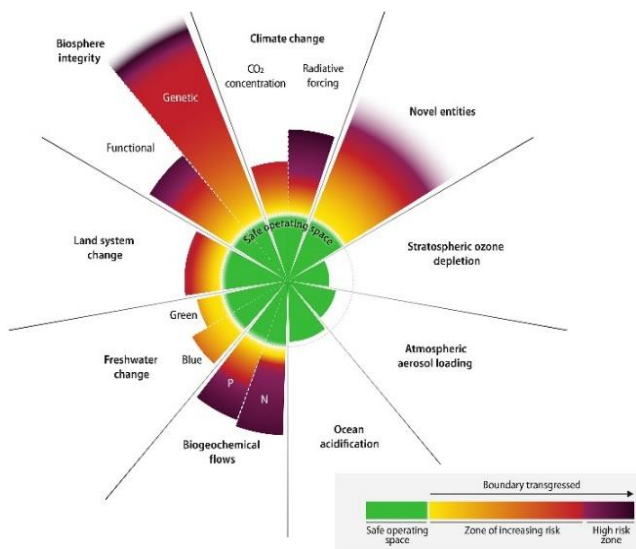


Fig. 1. Cadre des limites planétaires, repris de [4].

Il est possible de positionner l'EP dans ce cadre théorique de la *soutenabilité forte*. Nous savons d'ores et déjà que les CEP ont des IE significatifs, que ce soit durant la phase de production intensive en ressources, durant l'utilisation ou les processus de traitement en fin de vie. Concernant cette dernière phase, les CEP hors d'usage font partie de la filière de retraitement des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Les DEEE sont passés de 34 milliards de kg en 2010 à 62 milliards de kg en 2022 dans le monde, et les prévisions estiment la quantité de DEEE à 82 milliard de kg à l'horizon 2030 [5]. Dans ce contexte, l'*écoconception* et l'*économie circulaire* sont présentées dans la littérature scientifique comme des perspectives de réflexion pour réduire les DEEE ainsi que les IE au sens large.

En 2019, Ceschin et Gaziulusoy publient un ouvrage retraçant l'évolution de la prise en compte des enjeux de la soutenabilité en conception [6]. Plusieurs approches de conception y sont caractérisées en termes d'objectifs, d'applicatifs et de limites. Les auteurs positionnent également les différentes approches de conception les unes par rapport aux autres. Ainsi, l'*écoconception* y est définie comme une approche qui s'intéresse à la réduction des IE sur l'ensemble des étapes du cycle de vie [6]. Elle est souvent appuyée par l'utilisation de l'analyse du cycle de vie (ACV), qui permet d'évaluer les IE sur

l'ensemble du cycle de vie d'un produit ou d'un système. Les approches de *green design* et de *design for X* (X faisant référence à une fonctionnalité perçue comme plus durable : réparabilité, démontabilité, recyclabilité, etc.) sont positionnés comme inclus dans l'éco-conception [6]. Le *green design* s'intéresse à la phase de production dans le cycle de vie, et oriente la conception vers l'optimisation de la quantité et du type de matière, tout en supprimant notamment des matériaux toxiques. Le *design for X* est souvent orienté vers la fin de vie, afin de concevoir des produits qui soient plus réutilisables, plus réparables, etc.

D'autre part, l'économie circulaire suscite un intérêt croissant en tant qu'axe de recherche potentiel pour réduire les IE. Les acteurs académiques, institutionnels et privés se sont emparés de la notion d'économie circulaire, et sans définition faisant consensus, un grand nombre de définitions ont émergé [7], [8]. Nous faisons ici le choix de nous référer à la définition proposée par [7] : « Une économie circulaire décrit un système économique basé sur des modèles d'entreprise qui remplacent le concept de « fin de vie » par la réduction, la réutilisation alternative, le recyclage et la récupération des matériaux dans les processus de production/distribution et de consommation, opérant ainsi au niveau micro (produits, entreprises, consommateurs), méso (parcs éco-industriels) et macro (ville, région, nation et au-delà), dans le but d'accomplir un développement durable, ce qui implique la création de qualité environnementale, de prospérité économique et d'équité sociale, au profit des générations actuelles et futures. ». Cette définition s'appuie notamment sur le cadre des XR, X étant un nombre qui varie selon les références. Ce cadre met en avant les différentes stratégies (réutilisation, réparation, réduction, ...) pouvant être mises en œuvre pour activer l'économie circulaire. On parlera aussi de *stratégies d'économie circulaire*.

Cet article n'a pas pour objectif de proposer une approche de conception permettant de s'intégrer dans le cadre de la *soutenabilité forte*. Notre objectif est de proposer des pistes de recherche pour la conception pour la soutenabilité en EP en explicitant des contraintes et limites 1) des pratiques d'écoconception et 2) d'applications de stratégies d'économies circulaire qui ont pu être abordées dans d'autres domaines de la recherche.

3. ETAT DE L'ART DE LA RECHERCHE SUR L'ECO-CONCEPTION EN EP

L'analyse d'un état de l'art de la recherche sur l'éco-conception en EP a permis de définir une classification autour de deux axes principaux : le premier axe regroupe les études dont l'objectif est l'évaluation des IE, tandis que le second axe est centré sur les études visant à intégrer les IE dans le processus de conception. L'objectif de cette classification est de distinguer deux usages des méthodes d'évaluation de la soutenabilité/circularité : un usage rétrospectif de la méthode d'analyse de la soutenabilité/circularité l'ACV, un usage centré sur l'intégration en conception, pour lequel la méthode d'analyse est utilisée de manière proactive. L'état de l'art sera analysé à partir de 56 articles recueillis sur IEEE, ScienceDirect et ResearchGate.

3.1. Usage rétrospectif des méthodes d'analyse de la soutenabilité/circularité

La majeure partie des études associées à la recherche sur la soutenabilité environnementale en EP se concentre sur l'évaluation des IE des CEP ou des composants par la méthode et les outils d'ACV. Quelques études s'intéressent aux ACV des

CEP [9], [10]. Une étude en deux parties a proposé un inventaire de cycle de vie (ICV) d'un convertisseur, réadaptable à d'autres applications [11][12]. Les études sur les composants, notamment les condensateurs [13], [14] et les semi-conducteurs [15], sont également de plus en plus nombreuses, ainsi qu'au niveau des PCB et des technologies de montage [16][17]. Ces études répondent à un besoin croissant de données pour effectuer des comparaisons des systèmes aux regard de leurs IE associés. Elles se concentrent principalement sur la question des données afin d'alimenter l'écoconception des CEP. Cependant, on retrouve aussi quelques articles qui s'intéressent à l'élaboration d'indicateurs transverses en lien avec l'économie circulaire par exemple. Ces indicateurs sont conçus pour alimenter la démarche de *design for X*, dans une optique d'économie circulaire. Un indicateur, eDiM, a été développé pour prendre en compte la démontabilité des circuits d'électronique, sans inclure le démontage de composants sur PCB [18]. Une seconde étude s'intéresse à l'ajout du démontage de composants sur carte à cet indicateur [19]. Une méthode de mesure permettant de déterminer la réutilisabilité d'un composant passif est proposée dans [20]. Enfin, une autre approche visant à améliorer la réparabilité des convertisseurs est proposée par [21]. L'article montre que la réparabilité peut être renforcée par la présence d'une documentation collaborative open-source. La fonction « documentation collaborative open-source » peut être décrite comme un indicateur qualitatif, c'est-à-dire un critère de conception, favorisant l'implémentation de la réparation.

3.2. *Usage proactive en conception des méthodes d'analyses de la soutenabilité/circularité*

L'écoconception, telle que définie dans le cadre théorique, est une approche sur laquelle des travaux ont déjà été menés au sein de l'EP. Le *green design*, par exemple, a été intégré à l'EP, notamment lors de l'adoption de la directive européenne RoHS, qui vise à remplacer certaines substances toxiques par d'autres moins nocives, comme le plomb dans les soudures. Cette approche reste dynamique, comme en témoigne l'avancée dans l'utilisation de matériaux biosourcés pour la fabrication de condensateurs ou de PCB [22]. On rencontre aussi des approches de *design for X* à l'échelle de composant, comme un transformateur modulaire [23], ou à l'échelle de convertisseurs, avec quelques publications sur la modularité, que ce soit des applications [24], ou de la méthodologie [25][26]. Des travaux ont également consisté à simuler des convertisseurs modulaires afin d'analyser la pertinence de la modularité pour réduire les IE [27][28]. Ces approches de *design for X* restent toutefois marginales. D'autres approches sont cependant présentes dans la littérature. Une première approche, dite d'« éco-dimensionnement » [29], consiste à réaliser une optimisation de la quantité totale d'énergie primaire consommée sur l'ensemble du cycle de vie et de la masse du convertisseur. Ces deux critères ne sont pas des indicateurs d'IE, mais ils peuvent les refléter partiellement. Cette approche a été appliquée notamment au niveau d'un convertisseur [30] et d'un composant [31]. Une seconde approche consiste à utiliser les IE comme des critères d'optimisation dans une conception, on pourra parler d'éco-optimisation [32][33]. Enfin, un article propose d'utiliser une ACV paramétrée pour alimenter l'écoconception d'un convertisseur. Le principe consiste à intégrer une paramétrisation dans une ACV afin de suivre l'évolution des IE durant la conception, d'identifier les paramètres majeurs en termes d'IE et de réitérer des étapes de conception [34]. Les auteurs proposent également une méthode pour accompagner l'écoconception [35].

4. IDENTIFICATION DE QUELQUES LIMITES DE L'ECOCONCEPTION ET DE L'ECONOMIE CIRCULAIRE

L'écoconception est une notion relativement nouvelle pour la communauté de l'EP, mais elle constitue un sujet de recherche plus ancien dans d'autres domaines scientifiques [8]. Diverses études sur le sujet traitent des forces et des faiblesses de cette approche. De même l'économie circulaire est un concept qui a intéressé plusieurs domaines de recherche, mais qui ne fait pas l'unanimité. Les diverses critiques adressées à l'écoconception ou à l'économie circulaire s'appliquent également lorsque ces concepts sont appliqués à nos objets d'étude. Identifier et analyser les critiques formulées par d'autres domaines de recherche pourrait donc s'avérer utile pour faire progresser la recherche en matière de soutenabilité en EP en visant un objectif de soutenabilité forte. Dans ce cadre, nous proposons d'exposer quelques critiques tirées d'une littérature scientifique de différents domaines scientifiques (génie industriel et conception, économie, écologie industrielle). Dans un premier temps on traitera des critiques concernant l'éco-conception, puis celles concernant l'économie circulaire.

4.1. *Des limites à l'écoconception en EP*

En EP, la question de la réduction des IE est souvent adressée par le prisme de l'amélioration de l'efficacité énergétique et de l'augmentation de la densité de puissance. Il est aujourd'hui remis en question que ces gains de quelques pourcents d'efficacité seraient un effort suffisant vis-à-vis des limites planétaires [33]. Les gains incrémentaux que nous pouvons encore réaliser en termes d'efficacité sont en réalité marginaux, et cela en dépit de la nécessité de réduire les IE de l'EP. On peut faire une critique similaire à propos de l'écoconception, tel que le concept est actuellement appliqué en EP. En effet, une approche centrée sur les aspects techniques habituellement traités en conception peut nous permettre de réduire les IE par incréments, mais chaque étape sera plus complexe et moins bénéfique que la précédente. Il est ainsi possible d'atteindre un seuil de réduction des IE [6]. Aussi, cette pratique de conception ne permet pas de soutenir des propositions de conception radicalement nouvelles [6].

Autrement dit, l'échelle du produit ne permet pas de prendre en compte les potentiels effets systémiques associés à un choix de conception. Par exemple, lors de la conception d'un produit, l'augmentation possible des IE cumulés liés à son industrialisation n'est pas prise en compte. On peut notamment citer le paradoxe de *Jevons* qui implique une augmentation de la consommation d'énergie par intensification de l'usage ou par augmentation de la demande, lorsque l'efficacité d'un produit augmente. Cet effet systémique peut ainsi annuler les gains réalisés en matière de réduction des IE [36]. Différents effets systémiques sont susceptibles d'apparaître, souvent regroupés sous la dénomination d'*effets rebonds*, et des travaux de modélisation sont réalisés en conception pour les prendre en compte [37]. D'autres effets comportementaux peuvent également influencer l'évolution des IE des produits. Par exemple, le lien qu'une personne crée avec un objet et qui peut limiter l'obsolescence émotionnelle ou les impacts liés aux comportements [38]. De fait, l'écoconception telle qu'elle a été abordée en EP ne permet que des améliorations superficielles, limitées par le cadre technologique que nous nous imposons. Il existe d'autres pratiques d'écoconception qui élargissent la capacité des concepteurs à intégrer les enjeux de soutenabilité. Enfin, l'écoconception, à l'instar de l'ACV, se concentre sur les IE, omettant les implications sociales de nos activités de conception [6].

Encore une fois, les conditions nécessaires et les implications de la soutenabilité environnementale sont d'ordre sociotechnique. Autrement dit, si les concepteurs en EP souhaitent continuer à revendiquer un intérêt pour la soutenabilité environnementale selon un récit de « transition énergétique », il leur est nécessaire de s'outiller en conséquence. Cela implique d'identifier les conditions sociotechniques de la soutenabilité à atteindre. Puis de lier les choix des concepteurs en EP avec les outils d'analyse de leur solution, qui sont parfois en dehors de la discipline EP (par exemple, l'analyse environnementale, ou une analyse de circularité), et parfois en dehors de l'ingénierie (par exemple, une étude sociologique).

4.2. Des limites à l'économie circulaire en EP

Pour commencer, le lien entre l'économie circulaire et la soutenabilité dite *forte* n'est pas spécifiquement étudié. On peut discuter de la différence fondamentale de vision entre l'économie circulaire et la soutenabilité. Des auteurs discutent de l'articulation entre soutenabilité et économie circulaire : la distinction est principalement économique pour l'économie circulaire, avec de potentielles réductions des IE. La vision de la soutenabilité englobe quant à elle les dimensions environnementales, économiques et sociétales [39]. De plus, l'économie circulaire s'intéresse principalement à la question de la raréfaction des ressources et de l'augmentation des déchets résultants d'un modèle de production linéaire. À la différence de la notion de soutenabilité, l'économie circulaire n'a pas été pensée selon le prisme d'un compromis multifactoriel entre plusieurs IE [8]. De même, un manque d'approche holistique en termes d'IE pourrait entraîner des effets systémiques et augmenter l'impact environnemental global (effets rebonds) [8].

Par ailleurs, une incompatibilité existe entre l'économie circulaire et la croissance de la production [40][41]. L'argument avancé est que si la demande à un instant donné est supérieure au stock de matières prêtes à être réutilisées au même instant, alors un apport de matières issues de la production primaire est nécessaire, ce qui mène à un paradigme non circulaire. Une autre problématique d'une économie circulaire couplée avec un accroissement de la consommation est la notion de stock. Comme le souligne [41], il est nécessaire que peu de matière soit immobilisée dans un stock dormant et que la société rejette donc la majeure partie de la matière sous forme de déchet, c'est-à-dire de stock prêt à l'emploi, pour pouvoir répondre à une forte demande. Cette vision pose question quant aux enjeux de soutenabilité, car elle pourrait inciter à réduire la durée de vie des produits, augmentant ainsi le nombre de processus nécessaires pour reboucler les flux, ce qui pourrait avoir des IE cumulés plus importants. Autrement dit, les pratiques d'économie circulaire focalisées sur la circularité des flux de matériaux et de produits sans remise en question de l'augmentation de la production industrielle et des usages mènent à des gains superficiels.

Une autre critique portée par [42] concerne les flux de matière provenant d'un processus de rebouclage, comme la réparation ou le recyclage. Une première approximation simpliste serait que les flux provenant du rebouclage sont équivalents aux flux de production primaire, avec un rapport de un à un. De ce fait, les flux provenant du rebouclage suppriment les flux primaires (à consommation constante), ce qui permettrait de réduire les IE. En réalité, il n'y a aucune raison de garantir cette substitution automatique des flux. Il peut donc advenir une sommation du flux primaire et d'un nouveau flux de produits rebouclés, ajoutant alors les IE générés par le rebouclage aux IE des flux initiaux. C'est notamment le cas pour

le recyclage, car la matière recyclée peut être de moins bonne qualité que celle issue de la production primaire (sous-cyclage) et la substituabilité n'est alors pas possible [42]. De plus, un prix inférieur pour des produits issus du recyclage peut aussi entraîner une augmentation de la consommation [42].

Une autre hypothèse souvent implicitement admise est qu'il suffirait d'activer une stratégie de l'économie circulaire, comme la réutilisation, le recyclage ou la remise à neuf, pour réduire les impacts. Le passage d'un paradigme linéaire à un paradigme circulaire pour un produit donné peut impliquer une reconception. Par exemple, le réemploi de bouteilles implique de passer des bouteilles en plastique à des bouteilles en verre. Or, lors de la fabrication, les bouteilles en verre ont des IE supérieurs à ceux des bouteilles en plastique. Par conséquent, les bouteilles en verre consignées sont moins efficaces pour réduire les IE que les bouteilles en plastique [43]. Cependant, cette étude est valable pour 8 réutilisations des bouteilles en verre. Il est intéressant de noter que ce nombre de réutilisations est corrélé à des facteurs non technologiques, comme un taux de dispersion d'un cycle à l'autre des bouteilles de verre de 10%, ainsi que l'obsolescence « esthétique » des bouteilles (rayures après 8 lavages). Cette étude illustre une reconception permettant le réemploi sans pour autant réduire automatiquement les IE. Les bénéfices de la consigne ne sont toutefois pas clairement établis. En effet, cela dépend notamment du nombre de réutilisations des bouteilles, mais celui-ci est ici entravé par les facteurs cités. Cet exemple est une illustration des aspects sociotechniques qu'un concepteur en EP devraient intégrer dans une démarche de conception pour un produit afin d'en réduire les IE associés. De même, il n'est pas possible de formuler de règle générique sur les gains potentiels de stratégie d'économie circulaire en termes de réduction des IE [44].

5. DISCUSSIONS ET PERSPECTIVES

La partie précédente a permis de mettre en évidence certaines limites des pratiques d'écoconception et de l'économie circulaire en EP, qui pourraient compromettre l'atteinte d'un espace de soutenabilité forte. Les critiques formulées dans cet article devront dans un premier temps être étayées par des apports bibliographiques plus complets, mais aussi par des travaux en EP, afin de soutenir l'approche proposée ici. Toutefois, la première proposition de critiques élaborée dans cet article doit permettre d'ouvrir de nouvelles perspectives de recherche pour le domaine de l'EP.

Des conceptions résolument nouvelles peuvent être proposées pour réduire les IE et répondre partiellement à une des limites de l'écoconception. La reconception est un sujet particulièrement intéressant dans le cadre de l'EP, en raison de la mauvaise réparabilité des CEP sur PCB. La spécialisation des CEP restreint aussi fortement les possibilités de réutilisation. Les problématiques liées aux besoins de reconception font écho au *design for X*, qui est une approche incontournable pour les recherches vers l'opérationnalisation de l'économie circulaire en EP. Les critiques émises soulignent la nécessité d'apporter un regard critique lorsqu'une reconception, avec pour objectif d'activer une stratégie de l'économie circulaire, est entreprise. Ce regard critique doit porter sur la différence nette IE entre l'ancienne conception et la nouvelle conception, mais aussi sur la mise en œuvre de la stratégie de l'économie circulaire dans un système sociotechnique. D'une part, il conviendra de prendre en considération d'éventuels paramètres en dehors de l'espace de conception usuel susceptibles d'influer sur l'évolution des IE. Et

d'autre part, il faudra étudier la possibilité d'effets systémiques. En effet, plusieurs critiques soulignent un manquement des approches d'écoconception et de l'économie circulaire en termes de prise en compte des effets systémiques, qu'il s'agisse d'effets rebonds ou d'effets de passage à l'échelle [44].

Ces limites ont également permis de mettre en évidence notre périmètre d'action réduit de concepteur technique. L'espace de conception usuel, focalisé sur les aspects techniques en phase de fabrication, ne nous permet pas de prendre en compte l'ensemble des leviers d'actions. En effet, [42] nous fait remarquer que l'économie circulaire est fondamentalement un problème économique et que les déplacements de flux ne sauraient être réduits à des modèles d'ingénierie. Les critiques adressées aux pratiques d'écoconception mettent en évidence l'importance des aspects comportementaux dans la génération des IE, ainsi que la non prise en compte des enjeux sociaux. Il est également avancé qu'une vision purement ingénieur est insuffisante pour atteindre une soutenabilité forte et qu'elle pourrait être assimilée à une nouvelle forme de *greenwashing* [8].

De même, [6] souligne le caractère insuffisant de l'écoconception et préconise le développement d'approches plus systémiques. L'article propose notamment un cadre de réflexion dans lequel notre recherche peut s'intégrer.

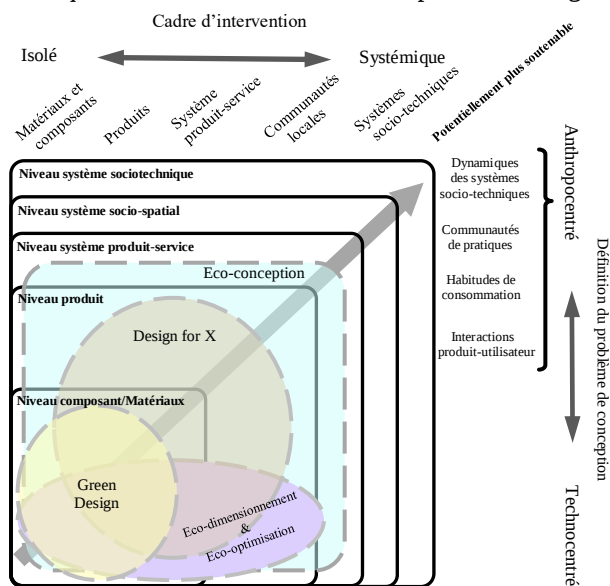


Fig. 2. Cadre de conception pour la soutenabilité, adapté de [6].

Sur la figure 2, le niveau *composants et matériaux* inclut les interventions qui améliorent un produit de manière incrémentale en changeant un composant ou un matériau. Le *green design* se place à ce niveau de conception. Le niveau *produit* concerne le développement de nouveaux produits ou l'amélioration de produits existants en prenant en compte l'ensemble du cycle de vie. Le *design for X*, l'éco-optimisation, l'éco-dimensionnement et l'écoconception sont inclus dans ce niveau de conception. Le niveau *système produit-service* s'intéresse aux combinaisons produits-services, incluant la question des acteurs et des modèles économiques. Certaines pratiques d'écoconception peuvent s'inscrire dans ce cadre. Le niveau *système spatio-social* prend en compte les infrastructures humaines et les conditions spatio-sociales des communautés à différentes échelles, allant d'un quartier à une ville. Enfin, le niveau *système sociotechnique* comprend les approches qui considèrent les besoins et la manière de répondre à ces besoins, en mettant l'accent sur les interactions entre les systèmes spatio-sociaux et techniques pour supporter la transition vers des systèmes sociotechniques.

Les approches considérées pour le moment en EP ne dépassent pas a priori le second cadre, ce qui peut s'expliquer par la relative nouveauté de la prise en compte de la soutenabilité en conception d'EP. De par les travaux émanant des autres champs disciplinaires, nous pouvons établir que le focus technologique qui caractérise notre approche n'est pas suffisant pour parvenir à un espace de soutenabilité forte. De fait, les avancées envisagées dans le cadre défini par [6] requièrent une approche interdisciplinaire, c'est-à-dire la collaboration avec d'autres domaines scientifiques pour adresser la soutenabilité selon plusieurs axes disciplinaires [8], [42], [45]. Il est cependant à noter que les pistes de réflexion exposées ici ne sont pas des solutions garantissant d'atteindre un espace de soutenabilité forte, l'interdisciplinarité n'est que la prochaine étape de réflexion en vue d'atteindre cet espace, ainsi que d'élargir notre champ de réflexion à une problématique qui dépasse largement les seuls champs technologiques.

6. CONCLUSION

Un cadre théorique de la soutenabilité, une définition de l'écoconception et une définition de la notion d'économie circulaire ont été posés dans cet article afin de structurer la réflexion. L'intention de suivre des pistes de réflexion pour atteindre un espace de soutenabilité forte a clairement été énoncée, sans pour autant présupposer de notre capacité à y parvenir actuellement. L'analyse de l'état de l'art sur la soutenabilité en EP révèle que la recherche en EP commence à proposer des approches d'écoconception, intégrant le *design for X* ainsi que le *green design*. L'analyse du cycle de vie est notamment une méthode largement utilisée pour évaluer les IE des CEP et des composants d'EP. Ces différentes approches ont été développées dans d'autres domaines de recherche que celui du génie électrique, et le développement de la recherche autour d'elles a permis de mettre en évidence les limites de ces pratiques et de ces notions. Dans notre domaine de recherche, nous pouvons nous inspirer des travaux réalisés pour ouvrir de nouvelles perspectives. Dans cet article, nous avons proposé de considérer les critiques émises et de les analyser pour comprendre la portée qu'elles peuvent avoir dans nos activités de recherche. En perspectives de ce travail, il est nécessaire de continuer à questionner les limites de ces notions, par la bibliographie existante et non traitée ici, mais aussi par des apports de nos propres travaux. Enfin, nous invitons la communauté de l'EP à initier des activités interdisciplinaires et à adopter une approche holistique dans les travaux de recherche, dans le but d'atteindre un niveau de soutenabilité élevé.

7. REFERENCES

- [1] O. fédéral du développement territorial ARE, « 1987: Le Rapport Brundtland ». Consulté le: 8 janvier 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.are.admin.ch/are/fr/home/medien-und-publikationen/publikationen/nachhaltige-entwicklung/brundtland-report.html>
- [2] E. Neumayer, « Human Development and Sustainability », *Hum. Dev. Rep. Off. HDRO U. N. Dev. Programme UNDP Hum. Dev. Res. Pap.* 2009 *Present*, vol. 13, janv. 2010, doi: 10.2139/ssrn.1711867.
- [3] J. Rockström *et al.*, « A safe operating space for humanity », *Nature*, vol. 461, n° 7263, p. 472-475, sept. 2009, doi: 10.1038/461472a.
- [4] K. Richardson *et al.*, « Earth beyond six of nine planetary boundaries », *Sci. Adv.*, vol. 9, n° 37, p. eadh2458, sept. 2023, doi: 10.1126/sciadv.adh2458.
- [5] « The Global E-waste Monitor 2024 », E-Waste Monitor. Consulté le: 6 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://ewastemonitor.info/the-global-e-waste-monitor-2024/>

- [6] F. Ceschin et İ. Gaziulusoy, *Design for Sustainability: A Multi-level Framework from Products to Socio-technical Systems*. London: Routledge, 2019. doi: 10.4324/9780429456510.
- [7] J. Kirchherr, D. Reike, et M. Hekkert, « Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions », *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 127, p. 221-232, déc. 2017, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.005.
- [8] M. Calisto Friant, W. J. V. Vermeulen, et R. Salomone, « A typology of circular economy discourses: Navigating the diverse visions of a contested paradigm », *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 161, p. 104917, oct. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104917.
- [9] B. Baudais, H. Ben Ahmed, G. Jodin, N. Degrenne, et S. Lefebvre, « Life Cycle Assessment of a 150 kW Electronic Power Inverter », *Energies*, vol. 16, n° 5, Art. n° 5, janv. 2023, doi: 10.3390/en16052192.
- [10] F. Musil, C. Harringer, A. Hiesmayr, et D. Schoenmayr, « How Life Cycle Analyses are Influencing Power Electronics Converter Design », in *PCIM Europe 2023; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, mai 2023, p. 1-9. doi: 10.30420/566091368.
- [11] A. Nordelöf, M. Alatalo, et M. Ljunggren, « A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit—part I: design and composition », *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 24, p. 78-92, janv. 2019, doi: 10.1007/s11367-018-1503-3.
- [12] A. Nordelöf, « A scalable life cycle inventory of an automotive power electronic inverter unit—part II: manufacturing processes », *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 24, p. 694-711, avr. 2019, doi: 10.1007/s11367-018-1491-3.
- [13] C. Zhang, Y. Zheng, H. Huang, Z. Liu, et J. Jing, « Environmental impact assessment of aluminum electrolytic capacitors in a product family from the manufacturer's perspective », *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 28, p. 1-15, déc. 2022, doi: 10.1007/s11367-022-02117-x.
- [14] L. Smith, T. Ibn-Mohammed, S. C. L. Koh, et I. M. Reaney, « Life cycle assessment and environmental profile evaluations of high volumetric efficiency capacitors », *Appl. Energy*, vol. 220, p. 496-513, juin 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.03.067.
- [15] L. Vauche, G. Guillemaud, J.-C. Lopes Barbosa, et L. Di Cioccio, « Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment (LCA) of GaN Power Semiconductor Device », *Sustainability*, vol. 16, n° 2, p. 901, janv. 2024, doi: 10.3390/su16020901.
- [16] L. Braunwarth, S. Amrhein, T. Schreck, et M. Kaloudis, « Ecological comparison of soldering and sintering as die-attach technologies in power electronics », *J. Clean. Prod.*, vol. 102, p. 408-417, sept. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.03.100.
- [17] C. Hermann, J. Gediga, et N. Warburg, « Eco-comparison between ceramic and epoxy based populated PWBs », *IEEE*, 2001, p. 303-308. doi: 10.1109/ISEE.2001.924544.
- [18] P. Vanegas et al., « Ease of disassembly of products to support circular economy strategies », *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 135, p. 323-334, août 2018, doi: 10.1016/j.resconrec.2017.06.022.
- [19] Tugce Turkbay Romano, Li Fang, Maud Rio, Thecle Alix, Julien Melot, et al., Évaluation de la démontabilité des convertisseurs électroniques de puissance pour une circularité améliorée. SYMPOSIUM DE GENIE ELECTRIQUE SGE, Jul 2023, Lille, France. hal-04161305
- [20] B. Rahmani, Y. Lembeye, M. Rio, et J.-C. Crebier, « Analysis of Passive Power Components Reuse », in *PCIM Europe digital days 2021; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, mai 2021, p. 1-8. Consulté le: 16 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9472355>
- [21] J. Alinei, G. Arthaud, L. F. L. Villa, A. Orgiu, S. Karaani, et C. Baron, « Improving the reparability of technical systems, a methodological proposal based on collaborative documentation -Example/case of an open source power converter ».
- [22] C. Farkas et al., « Sustainable printed circuit board substrates based on flame-retarded PLA/flax composites to reduce environmental load of electronics: Quality, reliability, degradation and application tests », *Sustain. Mater. Technol.*, vol. 40, p. e00902, juill. 2024, doi: 10.1016/j.susmat.2024.e00902.
- [23] F. Groon, H. Beiranvand, G. Can, et M. Liserre, « Circular Economy Oriented and Reconfigurable Planar Transformer Design for Isolated DC/DC Converters », in *PCIM Europe 2024; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, juin 2024, p. 3375-3384. doi: 10.30420/566262476.
- [24] L. Pinto, L. Riondet, M. Rio, Y. Lembeye, et J.-C. Crebier, « Addressing modularity in codesigned power electronics », *Procedia CIRP*, 2025.
- [25] M. Rio, K. Khannoussi, J.-C. Crebier, et Y. Lembeye, « Addressing Circularity to Product Designers: Application to a Multi-Cell Power Electronics Converter », *Procedia CIRP*, vol. 91, p. 134-139, 2020, doi: 10.1016/j.procir.2020.02.158.
- [26] T. T. Romano, T. Alix, Y. Lembeye, N. Perry, et J.-C. Crébier, « Towards circular power electronics in the perspective of modularity », *Procedia CIRP*, vol. 116, p. 588, mai 2023, doi: 10.1016/j.procir.2023.02.099.
- [27] B. Rahmani, M. Rio, Y. Lembeye, et J.-C. Crébier, « Opportunités de la modularité pour l'écoconception de convertisseurs de puissance », juill. 2021.
- [28] B. Baudais, H. B. Ahmed, G. Jodin, N. Degrenne, et S. Lefebvre, « Environmental Impact of Modular Power Electronics Systems Considering Diagnostic-Driven Unit Replacement », in *PCIM Europe 2024; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, juin 2024, p. 3182-3191. doi: 10.30420/566262451.
- [29] B. Multon, H. Ben Hamed, V. Debusshere, J. Aubry, C. Jaouen, et F. Barruel, « Expériences de recherche en éco-conception dans le domaine du génie électrique », *Eur. J. Electr. Eng.*, vol. 15, n° 5, p. 433-449, oct. 2012, doi: 10.3166/ejee.15.433-449.
- [30] C. Jaouen, B. Multon, et F. Barruel, « Design Optimization Methodology for Power Converters based on Global Energy Requirement Criteria. Application to a Flyback DC-DC Structure », août 2011.
- [31] G. De Freitas Lima, B. Rahmani, M. Rio, Y. Lembeye, et J.-C. Crebier, « Eco-Dimensioning Approach for Planar Transformer in a Dual Active Bridge (DAB) Application », *Eng.*, vol. 2, n° 4, Art. n° 4, nov. 2021, doi: 10.3390/eng2040035.
- [32] A. Voldoire, « Sustainability Indicators Integration into the Optimal Design Methodology of Power Electronic Converters », in *2024 IEEE Design Methodologies Conference (DMC)*, nov. 2024, p. 1-6. doi: 10.1109/DMC62632.2024.10812128.
- [33] J. Huber, L. Imperiali, D. Menzi, F. Musil, et J. W. Kolar, « Energy Efficiency is Not Enough! », *IEEE Power Electron. Mag.*, vol. 11, n° 1, Art. n° 1, mars 2024, doi: 10.1109/PEL.2024.3354013.
- [34] L. Fang, Y. Rosset, B. Sarrazin, P. Lefranc, et M. Rio, « Parametric LCA model for power electronic codesign process: Addressing MOSFET-Si and HEMT-GaN technological issues », *IET Power Electron.*, vol. 18, n° 1, Art. n° 1, janv. 2025, doi: 10.1049/pel2.12844.
- [35] L. Fang, P. Lefranc, et M. Rio, « Effective codesign implementation in power electronics: a method based on functional blocks », *Cogent Eng.*, vol. 11, juill. 2024, doi: 10.1080/23311916.2024.2382232.
- [36] L. Brookes, « Energy efficiency fallacies revisited », *Energy Policy*, vol. 28, n° 6, p. 355-366, juin 2000, doi: 10.1016/S0301-4215(00)00030-6.
- [37] L. Bornes, C. Letondal, et R. Vingerhoeds, « Understanding the Indirect Effects of Interactive Systems Within Systems of Systems », *INSIGHT*, vol. 26, n° 4, p. 18-21, 2023, doi: 10.1002/inst.12464.
- [38] T. Bhamra, Lilley ,Debra, et T. and Tang, « Design for Sustainable Behaviour: Using Products to Change Consumer Behaviour », *Des. J.*, vol. 14, n° 4, p. 427-445, déc. 2011, doi: 10.2752/175630611X13091688930453.
- [39] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, et E. J. Hultink, « The Circular Economy – A new sustainability paradigm? », *J. Clean. Prod.*, vol. 143, p. 757-768, févr. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.
- [40] C. Arnsperger et D. Bourg, « Vers une économie authentiquement circulaire: Réflexions sur les fondements d'un indicateur de circularité », *Rev. OFCE*, vol. 145, n° 1, Art. n° 1, mars 2016, doi: 10.3917/reof.145.0091.
- [41] F. Grosse, « Les limites du recyclage dans un contexte de demande croissante de matières premières », *Ann. Mines - Responsab. Environ.*, vol. 76, n° 4, p. 58-63, nov. 2014, doi: 10.3917/re.076.0058.
- [42] T. Zink et R. Geyer, « Circular Economy Rebound », *J. Ind. Ecol.*, vol. 21, n° 3, Art. n° 3, 2017, doi: 10.1111/jiec.12545.
- [43] R. Stefanini, G. Borghesi, A. Ronzano, et G. Vignali, « Plastic or glass: a new environmental assessment with a marine litter indicator for the comparison of pasteurized milk bottles », *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 26, n° 4, Art. n° 4, avr. 2021, doi: 10.1007/s11367-020-01804-x.
- [44] L. Riondet, M. Rio, V. Bernardet, et P. Zwolinski, « Designing emerging technologies taking into account upscaling », *Des. Sci.*, vol. 10, oct. 2024, doi: 10.1017/dsj.2024.33.
- [45] H. Corvellec, A. Stowell, et N. Johansson, « Critiques of the circular economy », *J. Ind. Ecol.*, vol. 26, août 2021, doi: 10.1111/jiec.13187.