

Vers une Circularité Fonctionnelle en Électronique de Puissance : Écoconception Multicritère, Hiérarchisation des Composants Métalliques et Traçabilité

Xavier BENOIT, Aziz ER-RAKI
Centum TnS

RESUME :

Dans un contexte de pression croissante sur les ressources critiques et de transition vers des technologies à faible impact environnemental, l'électronique de puissance apparaît comme un secteur stratégique, mais fortement exposé à des enjeux de durabilité. Cette étude propose une approche d'écoconception fonctionnelle pour les systèmes embarqués de conversion d'énergie, intégrant l'analyse environnementale (ACV), la hiérarchisation des fonctions techniques assurées par les composants, et une réflexion exploratoire sur la traçabilité des matériaux recyclés.

L'évaluation environnementale est conduite selon les normes ISO 14040/44, sur un convertisseur DCDC isolé 750/1500V – 100 kW, en comparant trois scénarios de configuration matière. Les résultats montrent que l'intégration d'aluminium recyclé dans les fonctions mécaniques permet de réduire l'empreinte carbone de plus de 80 %, à condition de respecter les exigences fonctionnelles associées. En revanche, la substitution aveugle de matériaux critiques dans des fonctions sensibles peut conduire à des transferts d'impact et à une dégradation de performance.

Pour renforcer la robustesse des décisions de conception, une base de données matière spécifique a été développée. Elle intègre les caractéristiques résiduelles des matériaux selon leur parcours, et propose un modèle d'affectation basé sur la compatibilité fonctionnelle. Cette base constitue une étape préparatoire à l'implémentation de systèmes de traçabilité numérique, orientés usage.

L'étude conclut sur la nécessité d'une circularité différenciée, fondée sur des critères environnementaux, techniques et historiques, en cohérence avec les standards émergents de l'économie circulaire industrielle et des passeports numériques de produits.

Mots-clés : Écoconception, Analyse de cycle de vie (ACV), Métaux critiques, Recyclage, Traçabilité, Circularité fonctionnelle, Aluminium recyclé, Hiérarchisation des fonctions

1. INTRODUCTION

1.1. Contexte et enjeux

L'électronique de puissance constitue une brique technologique essentielle pour les transitions énergétiques et numériques. Elle soutient le développement des mobilités électriques, la gestion des énergies renouvelables et la performance des systèmes industriels. Cependant, cette technologie repose sur des matériaux à haute performance,

notamment des métaux critiques, dont la production et l'utilisation soulèvent d'importants enjeux environnementaux, économiques et géopolitiques.

1.2. Défis de durabilité et circularité

L'extraction et la transformation des métaux tels que le cuivre et l'aluminium sont parmi les plus intensives en énergie et en émissions. Dans un contexte de raréfaction des ressources et de pression réglementaire croissante, les stratégies d'écoconception apparaissent comme une réponse incontournable. Toutefois, les approches classiques – réduction de masse, substitution, recyclage – demeurent souvent déconnectées des contraintes fonctionnelles réelles des composants.

1.3. Verrous scientifiques et industriels

Une question clé émerge : comment orienter intelligemment les matériaux recyclés ou substitués vers des usages compatibles, sans compromettre la performance technique ni générer de nouveaux impacts environnementaux ? Cette problématique appelle à dépasser les logiques génériques de recyclage pour intégrer la notion de "valeur fonctionnelle résiduelle", c'est-à-dire la capacité d'un matériau à remplir une fonction donnée, compte tenu de son histoire et de ses propriétés actuelles et de l'optimisation ponctuelle du processus de recyclage.

1.4. Objectif et positionnement de l'étude

Ce travail vise à développer une méthodologie d'écoconception fonctionnelle appliquée à un système d'électronique de puissance. L'approche repose sur trois piliers :

- L'analyse multicritère du cycle de vie des matériaux impliqués,
- Une décomposition fonctionnelle des composants selon leurs contraintes d'usage,
- L'intégration d'un dispositif de traçabilité orienté performance, permettant de qualifier les matériaux en fonction de leur parcours.

Cette approche vise à outiller la décision industrielle en matière de circularité, en alignant impact environnemental, exigences techniques et historique matière, en cohérence avec les standards européens émergents sur l'économie circulaire et les passeports numériques.

Plusieurs travaux récents ont souligné la nécessité de renforcer la circularité des métaux dans les systèmes électroniques, en particulier l'aluminium et le cuivre.

L'étude de l'ADEME (2023) fournit un diagnostic national sur le recyclage des métaux, mettant en évidence les marges de progression, notamment en matière de qualité des matériaux secondaires et d'intégration industrielle. Toutefois, elle reste à un niveau macro-économique sans entrer dans les spécificités fonctionnelles des applications électroniques.

La norme de traçabilité publiée par l'Aluminium Stewardship Initiative (ASI, 2017) apporte un cadre technique pour suivre les flux d'aluminium tout au long de la chaîne de valeur, mais son adoption reste limitée dans le secteur de l'électronique de puissance, en raison du manque d'outils opérationnels adaptés aux contraintes métiers.

Par ailleurs, Zhu et al. (2022) démontrent la faisabilité de la réutilisation directe de collecteurs en aluminium et cuivre issus de batteries, à condition de disposer d'informations fiables sur leur historique matière – une problématique qui trouve un écho direct dans notre approche.

Enfin, les propositions de Dasaklis et al. (2020) concernant les architectures blockchain pour la logistique inverse des équipements électroniques posent les bases d'une traçabilité distribuée, mais nécessitent une granularité plus fine des données matériaux et des standards métiers encore émergents.

Ces limites justifient notre contribution, qui vise à articuler des outils d'Analyse du Cycle de Vie (ACV), une cartographie fonctionnelle des composants, et un système de traçabilité intelligent, pour construire un cadre décisionnel robuste favorisant la réutilisation matière sans dégradation fonctionnelle ni surtraitements.

2. ANALYSE ENVIRONNEMENTALE INITIALE

2.1. Enjeux environnementaux liés à l'électronique de puissance

L'électronique de puissance, en tant que technologie-clé pour les transitions énergétiques, est caractérisée par une forte intensité en matériaux, notamment en métaux techniques à haute performance. Cette dépendance matérielle soulève des préoccupations environnementales importantes, liées à l'extraction de ressources non renouvelables, à l'énergie grise embarquée et aux émissions associées.

2.2. Sensibilité environnementale des métaux critiques

La littérature scientifique identifie des métaux comme le cuivre, l'aluminium ou le tantale parmi les contributeurs majeurs aux impacts environnementaux dans les systèmes électroniques (Graedel et al., 2015 ; JRC, 2023). Ces métaux sont également classés comme critiques par la Commission Européenne en raison de leur vulnérabilité d'approvisionnement et de leur importance fonctionnelle. Ils interviennent dans des fonctions diverses : conduction électrique, dissipation thermique ou structuration mécanique.

2.3. Écoconception et limites du recyclage non orienté

Si l'intégration de matières recyclées est fréquemment avancée comme levier d'écoconception, plusieurs études soulignent les limites de cette approche lorsque le recyclage

n'est pas orienté. En particulier, le risque de dégradation des propriétés fonctionnelles (conductivité, rigidité, pureté) peut conduire à une perte d'usage, voire à un "downcycling" environnemental et technique (Brunner & Rechberger, 2004 ; Peña et al., 2021).

2.4. Nécessité d'un couplage entre usage, impact et traçabilité

Face à ces constats, une piste émergente consiste à associer les matériaux recyclés à des fonctions compatibles, sur la base de leur historique et de leurs propriétés résiduelles. Cette démarche suppose de croiser des approches d'ACV orientées usage, une hiérarchisation fonctionnelle des composants, et des dispositifs de traçabilité permettant de suivre les lots de matériaux tout au long de leur cycle de vie.

3. METHODOLOGIE

3.1. Approche générale

L'objectif de cette étude est d'évaluer la faisabilité environnementale de stratégies d'écoconception fondées sur l'intégration différenciée de matériaux recyclés dans un système d'électronique de puissance, en tenant compte de la diversité fonctionnelle des composants. Pour ce faire, une démarche méthodologique en trois volets a été adoptée :

1. Une analyse de cycle de vie (ACV) comparative multicritère,
2. Une décomposition fonctionnelle des composants selon leurs exigences techniques,
3. Une réflexion prospective sur la mise en place d'un système de traçabilité orienté usage.

Ces trois axes sont mobilisés de manière complémentaire afin de structurer une évaluation environnementale cohérente avec les contraintes de performance fonctionnelle, tout en identifiant les conditions nécessaires à une mise en œuvre industrielle crédible.

3.2. ACV comparative multicritère

L'analyse environnementale a été réalisée conformément aux normes ISO 14040 et 14044. Elle porte sur un convertisseur embarqué DCDC (100 kW), conçu notamment pour des applications ferroviaires. Ce module a été sélectionné en raison de sa complexité architecturale (fonctions mécaniques, thermiques, électriques intégrées) et de sa représentativité sectorielle.

L'ACV a été modélisée sous OpenLCA, avec les paramètres suivants :

- Base de données : Ecoinvent v3.9 enrichie par des données internes,

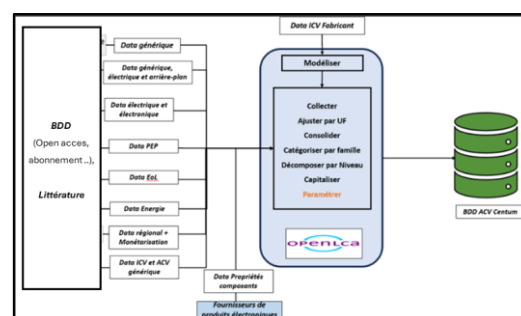


Figure 1 : Schématisation de la BDD d'ACV développée

- Méthode d'impact : Environmental Footprint (EF 3.1),

- Périmètre : extraction des matières premières, fabrication, usage, fin de vie (démantèlement, valorisation).

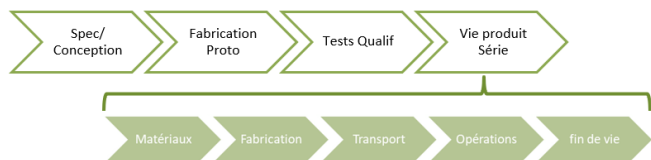


Figure 2 : Etapes de cycle de vie prises en compte

Trois scénarios ont été définis afin de comparer les effets environnementaux de différentes configurations matérielles :

- **S0 (référence industrielle)** : cuivre conventionnel et aluminium primaire,
- **S1** : substitution du cuivre par aluminium primaire,
- **S2** : substitution de cuivre par l'aluminium pour les bobinages et la substitution de l'aluminium primaire par aluminium recyclé pour les autres fonctions

L'analyse porte sur plusieurs indicateurs, notamment le potentiel de réchauffement global (GWP) et le potentiel d'épuisement des ressources abiotiques (ADPe).

3.3. Décomposition fonctionnelle des composants

Afin d'évaluer la pertinence environnementale et fonctionnelle des scénarios de substitution et de recyclage, une cartographie fonctionnelle des composants a été établie. Cette décomposition repose sur :

- L'identification des caractéristiques principales (conduction électrique, dissipation thermique, support mécanique),
- L'analyse des contraintes techniques associées (conductivité, rigidité, stabilité dimensionnelle),
- L'évaluation de la sensibilité aux variations induites par l'usage de matériaux recyclés (présence d'impuretés, propriétés métallurgiques altérées).

Tableau 1 : Propriétés, traitements et classifications des alliages d'aluminium

Application électronique	Propriétés requises	Traitements Alu nécessaires	Série Alu	Traitements Cuivre nécessaires	Série Cuivre
Dissipateurs thermiques	Haute conductivité thermique	Extrusion, anodisation, usinage de surface	Série 6000 (6061, 6063)	Laminage, revêtement anti-oxydation	Cu-ETP (C11000)
Boîtiers de puissance	Bonne rigidité, tenue aux chocs thermiques, faradisation	Moulage sous pression, passivation, peinture	Série 5000 (5083)	Brasage, encapsulation	Cu-DHP (CW024A)
Supports mécaniques	Résistance mécanique, stabilité dimensionnelle	Pliage CNC, sablage, finition anodisée	Série 3000 (3105)		
Barres de conduction	Haute conductivité électrique, faible résistance	Laminage, traitement thermique, usinage fin	Série 1000 (1050, 1350)	Recuit, étirage, émaillage	Cu-OF (C10200)
Condensateurs (cage ou boîtier)	Résistance à la corrosion, inertie chimique	Anodisation, vernis isolant, formage	Série 5000 (5052)	Laminage, découpe fine	CuSn (étamé)
PCB métalliques (substrats)	Bonne adhérence, expansion thermique contrôlée	Collage diélectrique, dépôt de couches isolantes	Série 1000 ou multicouche spécifique	Laminage, dépôt diélectrique	Cu-LP (low profile)

en électronique de puissance

Ce tableau met en évidence la diversité des exigences fonctionnelles associées aux composants métalliques dans les systèmes d'électronique de puissance, en comparant les solutions à base d'aluminium et de cuivre. Il illustre la nécessité d'une traçabilité fine pour chaque lot matière, en raison de la forte dépendance des performances aux traitements thermomécaniques et aux propriétés intrinsèques des alliages. L'identification des séries normalisées (ex. : 1000, 5000, Cu-ETP) permet de lier les propriétés attendues à des procédés industriels spécifiques, et de mieux anticiper les contraintes de réutilisation ou de recyclage. Dans une logique d'économie circulaire, cette granularité technique est indispensable pour orienter les flux de matière recyclée vers les fonctions compatibles, tout en évitant les traitements énergivores inutiles.

Cette étape permet de formuler une hypothèse de circularité fonctionnelle : certains composants – à faible niveau d'exigence fonctionnelle – peuvent intégrer des matériaux recyclés sans dégradation significative de performance, tandis que d'autres, plus critiques, exigent des matériaux primaires ou fortement caractérisés.

3.4. Réflexion exploratoire sur la traçabilité orientée usage

Bien que la traçabilité matière n'ait pas encore été implémentée dans ce projet, sa nécessité s'est imposée au fil de l'analyse. Une réaffectation fiable des matériaux recyclés suppose de disposer d'informations sur leur parcours, leurs propriétés résiduelles, et les traitements subis.

La réflexion actuelle explore les bases d'un système de traçabilité orientée usage, qui pourrait à terme reposer sur :

- Des dispositifs d'identification et de suivi (RFID, QR, capteurs embarqués),
- Des techniques de caractérisation non destructives (XRF, inspection optique),
- Une base de données numérique évolutive (jumeau matière) centralisant les propriétés fonctionnelles résiduelles.

L'objectif de cette ouverture est de poser les fondations d'un couplage futur entre évaluation environnementale, exigences fonctionnelles, et données matières, en cohérence avec les principes émergents de passeport numérique produit et de circularité par conception.

4. RESULTATS : ÉVALUATION ENVIRONNEMENTALE DU RECYCLAGE ET CONSTRUCTION D'UNE BASE DE DONNÉES MATIÈRE

4.1. Incertitudes méthodologiques liées à l'évaluation du recyclage

L'évaluation environnementale des matériaux recyclés dans les systèmes électroniques de puissance se heurte à un ensemble de limites méthodologiques bien documentées dans la littérature mais rarement surmontées dans les outils opérationnels. Les bases de données d'analyse de cycle de vie (ACV) intègrent généralement des valeurs moyennes ou agrégées pour les matériaux recyclés, sans distinction fine selon :

- Le type de recyclage (boucles ouvertes vs fermées),

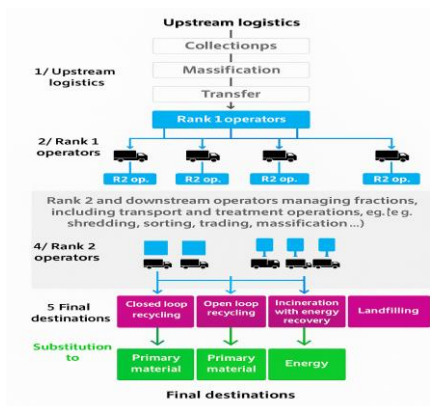


Figure 3 : Scénario de recyclage de l'aluminium édité à partir de la base de données ecosystém

Ce système ne prend pas en compte les caractéristiques résiduels de l'aluminium afin d'orienter les processus de recyclage d'une manière intelligente.

- Les procédés spécifiques employés (alliage, séparation, nettoyage de surface),

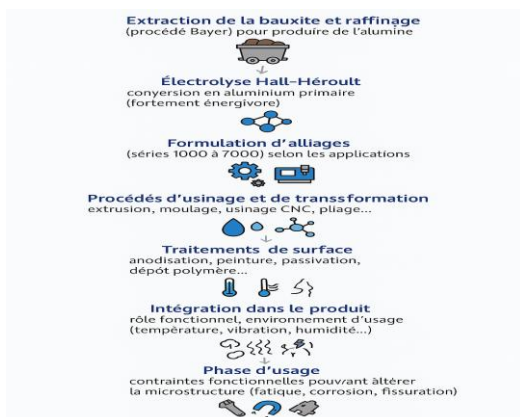


Figure 4 : Différentes étapes de cycle de vie d'aluminium avec les étapes de traitement supplémentaires nécessaires à l'électronique

- Les conditions géographiques et énergétiques du traitement,
- Les pertes ou altérations subies au cours du cycle de vie antérieur.

Cette faible résolution des données induit une incertitude significative dans le calcul des indicateurs environnementaux (GWP, ADPe, CED), rendant difficile la comparaison rigoureuse entre matériaux primaires et recyclés, notamment dans des applications à fortes exigences fonctionnelles.

4.2. Évaluation ACV comparative de scénarios matériaux

Dans ce contexte, une étude d'ACV multicritère a été menée sur un convertisseur de puissance embarqué (Neoboost DCDC – 1500 V, 100 kW), selon trois scénarios contrastés :

- **S0** : référence industrielle actuelle (aluminium primaire et cuivre standard),
- **S1** : substitution du cuivre par de l'aluminium primaire dans les fonctions conductrices,
- **S2** : intégration d'aluminium recyclé dans les structures mécaniques.

L'évaluation a été réalisée avec OpenLCA, en s'appuyant sur la base Ecoinvent v3.9, complétée par des données internes issues du projet collaboratif ELFICARE (soutenu par l'État

dans le cadre de France 2030 et par l'Union européenne - Next Generation EU dans le cadre du plan France Relance), qui s'inscrit dans une démarche visant à réduire l'empreinte environnementale des systèmes électroniques. Les résultats, normalisés et agrégés, montrent que :

Pour un cycle de vie produit dans sa globalité, l'impact des phases de test et de conception ne sont pas négligeables.

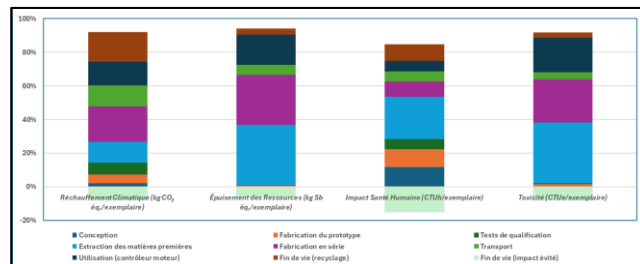


Figure 5 : Répartition des impacts environnementaux par phase de cycle de vie pour le scénario de références

Afin de bien identifier les points chauds, une analyse de diagramme de Sankey des principaux contributeurs avec des données filtrées a été réalisée (Seulement sur le cycle de produit série), ce diagramme montre bien que pour le scénario de références l'impact GWP vient principalement de l'aluminium qui est présent dans les pièces de structures et de refroidissement.

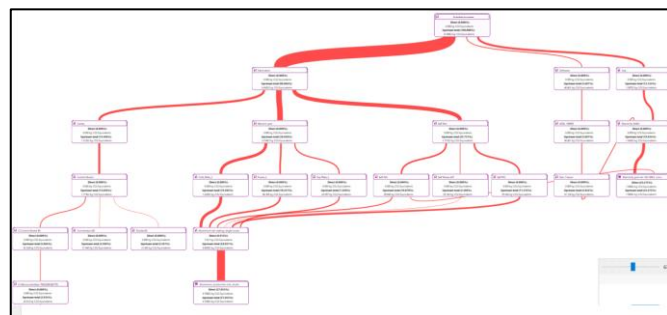


Figure 6 : Diagramme de Sankey de la contribution de chaque flux dans l'impact total de scénario de références sur le GWP (Cycle de vie Série)

Afin de bien analyser l'influence de nos variantes nous avons présenté ci-dessous l'impact sur le GWP pour les trois scénarios pour le cycle de vie produit série :

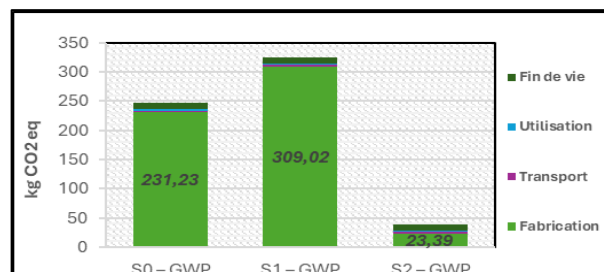


Figure 7 : Contribution des différentes phases de cycle de vie série dans le GWP pour les 3 scénarios étudiés

- Le scénario S2 permet une réduction de **-84,3 %** du GWP par rapport à S0, avec une diminution de l'ADPe de **-17,1 %**.
- Le scénario S1, bien que favorable sur le plan de la rareté (ADPe : -99,9 %), engendre une augmentation significative du GWP de **+31,5 %** du fait de l'utilisation d'aluminium primaire plus carboné.

Tableau 2 : Comparaison GWP et ADP pour les 3 scénarios de references

Scénario	GWP total (kg CO ₂ -eq)	ADPe (kg Sb-eq)	Variation GWP vs S0	Variation ADPe vs S0
0	105.2	2.3	—	—
1	138.3	0.0018	+31.5 %	-99.9 %
2	16.5	1.9	-84.3 %	-17.1 %

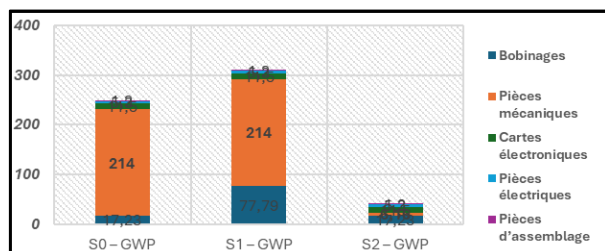


Figure 8 : Contribution des différentes familles de produits dans la phase « Fabrication » dans le GWP pour les 3 scénaris étudiés

Ces résultats confirment la pertinence d'une approche multicritère intégrant à la fois la pression sur les ressources abiotiques et l'impact climatique. Ils mettent également en évidence que la substitution ou le recyclage de métaux ne constitue pas, en soi, une garantie de bénéfice environnemental net. L'effet dépend fortement des conditions d'application et de la fonction assurée.

4.3. Élaboration d'une base de données environnementale matière orientée usage

Afin de dépasser les limites des bases génériques, une base de données spécifique a été élaborée pour cette étude. Elle vise à capturer les différences de comportement environnemental et technique des matériaux recyclés selon :

- Leur provenance (déchets post-consommation, chutes industrielles),
- Les procédés de recyclage appliqués (fusion, séparation, nettoyage chimique),
- Les propriétés résiduelles estimées (conductivité, rigidité, teneur en impuretés),
- Et les scénarios de fin de vie associés.

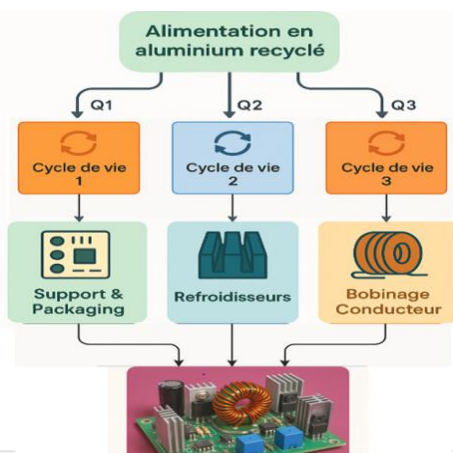


Figure 9 : Structuration de la BDD des Cycles de vie de l'aluminium recyclé par type d'utilisation

Cette base a été conçue comme un outil d'aide à la décision pour évaluer non seulement les impacts environnementaux en absolu, mais aussi la compatibilité fonctionnelle des matériaux recyclés avec les exigences techniques des composants. Elle constitue une étape intermédiaire vers l'implémentation de modèles de circularité différenciée et conditionnelle, dans lesquels la nature du matériau recyclé est systématiquement reliée à la fonction à laquelle il est destiné.

5. DISCUSSION

5.1. Apports méthodologiques et résultats significatifs

L'analyse conduite a permis de démontrer la pertinence d'une approche multicritère intégrant simultanément les considérations environnementales, fonctionnelles et matérielles dans l'évaluation des scénarios de circularité. Contrairement aux approches traditionnelles centrées sur des taux de recyclage globaux, notre méthodologie met en lumière l'intérêt d'une hiérarchisation fonctionnelle des composants pour identifier les conditions dans lesquelles l'usage de matériaux recyclés est justifiable et performant.

Les résultats obtenus soulignent que l'intégration d'aluminium recyclé dans des composants mécaniques peu sensibles permet de réduire de manière substantielle les émissions de gaz à effet de serre, sans dégrader la fonction technique assurée. En revanche, la substitution non ciblée de matériaux dans des composants à exigences critiques peut générer des transferts d'impact et compromettre la performance globale.

5.2. Limites et incertitudes persistantes

Malgré les apports de cette étude, plusieurs limites doivent être soulignées :

- **Qualité et résolution des données ACV** : les bases de données disponibles ne reflètent pas toujours la variabilité réelle des matériaux recyclés, en particulier pour les flux secondaires industriels ou post-consommation.
- **Modélisation simplifiée des procédés de fin de vie** : les scénarios intégrés restent dépendants de moyennes sectorielles, sans prise en compte fine des spécificités logistiques, énergétiques ou géographiques.
- **Absence d'un système de traçabilité opérationnel** : bien que notre travail ait esquissé les contours d'un tel dispositif, sa mise en œuvre réelle reste un chantier à venir, nécessitant des développements technologiques, normatifs et organisationnels.

5.3. Perspectives de développement et conditions de généralisation

Les perspectives ouvertes par cette étude concernent à la fois le renforcement méthodologique et la transposition industrielle :

- **Extension à d'autres matériaux critiques** : la logique de circularité fonctionnelle pourrait être appliquée au cuivre, aux terres rares, ou aux composites métalliques, en tenant compte de leurs spécificités physico-chimiques.
- **Structuration d'un référentiel de traçabilité** : un travail de normalisation est nécessaire pour caractériser la qualité circulaire d'un matériau recyclé

(indicateurs de vieillissement, de contamination, de stabilité fonctionnelle).

- **Interopérabilité numérique** : le couplage des bases ACV avec des outils industriels (ERP, PLM, MES) et des dispositifs de traçabilité (blockchain, jumeaux numériques) constitue un levier clé pour la transition vers une ingénierie circulaire intégrée.

Enfin, cette approche pose les bases d'un changement de paradigme : passer d'une économie du recyclage générique à une économie de la réaffectation ciblée, fondée sur la compatibilité entre les propriétés d'un matériau secondaire et les fonctions qu'il peut assurer.

6. CONCLUSIONS

Cette étude propose une démarche intégrée d'écoconception appliquée à un système d'électronique de puissance, fondée sur l'analyse croisée des impacts environnementaux (via l'ACV), des fonctions techniques assurées par les composants, et des conditions d'intégration des matériaux recyclés. Elle met en évidence la nécessité de dépasser les approches linéaires ou génériques du recyclage, pour construire une logique de circularité différenciée, fonctionnelle et orientée usage.

Les résultats obtenus confirment que :

- Le recours à des matériaux recyclés peut générer des bénéfices environnementaux significatifs, à condition d'être limité à des fonctions techniques compatibles ;
- Une évaluation multicritère est indispensable pour éviter les transferts d'impact ;
- La hiérarchisation fonctionnelle des composants constitue une grille de lecture robuste pour guider les décisions de substitution et de réaffectation.

Par ailleurs, cette étude souligne les lacunes actuelles des bases de données environnementales classiques, et démontre la valeur ajoutée d'une base de données spécifique intégrant les propriétés résiduelles et les scénarios différenciés de fin de vie des matériaux. Ce socle de connaissances constitue un préalable à la mise en place de systèmes de traçabilité orientée performance.

7. PERSPECTIVES

Les prochaines étapes visent à approfondir et opérationnaliser cette démarche :

- Étendre l'analyse à d'autres familles de matériaux critiques (cuivre, terres rares),
- Déployer, à l'échelle pilote, un système de traçabilité fondé sur jumeaux numériques et dispositifs de marquage,
- Formaliser un référentiel méthodologique interopérable avec les standards européens en cours sur la circularité et les passeports numériques produits,

- Intégrer des outils d'intelligence artificielle pour prédire les propriétés des matériaux recyclés à partir de leur historique d'usage, et automatiser les recommandations d'affectation.

In fine, ce travail s'inscrit dans une dynamique de transition vers une écoconception par la fonction, où les matériaux sont choisis et réaffectés en fonction de leur capacité à répondre à des exigences techniques précises, dans un cadre environnemental maîtrisé. Cette approche pourrait constituer un levier déterminant pour améliorer la résilience et la durabilité des systèmes électroniques de puissance.

8. REMERCIEMENTS

Ces recherches ont été menées dans le cadre du projet ELFICARE de Centum T&S, lauréat de l'AAP « SRC » 2023 de Bpifrance et à ce titre soutenu par l'État dans le cadre de France 2030 et par l'Union européenne - Next Generation EU dans le cadre du plan France Relance. Qu'ils soient tous remerciés de leur soutien. Ce projet ELFICARE vise la réduction de l'empreinte environnementale des équipements électroniques.

9. REFERENCES

- [1] Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2004). *Practical Handbook of Material Flow Analysis*. CRC Press.
- [2] Dubois, J., & Laurent, A. (2023). "Matériaux critiques et enjeux de souveraineté industrielle". *Revue Générale des Matériaux*, 38(2), 14-27.
- [3] Graedel, T. E., et al. (2015). "Criticality of metals and metalloids". *PNAS*, 112(14), 4257-4262.
- [4] JRC – European Commission Joint Research Centre (2023). *Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors*.
- [5] Peña, C. A., Saidani, M., et al. (2021). "Circularity indicators for complex systems: limits and perspectives". *Journal of Cleaner Production*, 293, 126201.
- [6] SCORELCA (2020). *Indicateurs de circularité matière dans l'analyse du cycle de vie*. Rapport technique.
- [7] Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). "Conceptualizing the circular economy". *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 221-232.
- [8] Niukkanen, J., et al. (2023). "Digital passports for circular materials". *Circular Economy and Sustainability*, 3(1), 15-31.
- [9] ISO 14040:2006. *Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework*.
- [10] ISO 14044:2006. *Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines*.
- [11] ADEME. (2023). *Étude du potentiel d'amélioration du recyclage des métaux en France*. Agence de la transition écologique. Disponible sur : <https://bibliothèque.ademe.fr/economie-circulaire-et-dechets/6958>
- [12] Aluminium Stewardship Initiative (ASI). (2017). *Norme de la Chaîne de Traçabilité (CdT)*. Version 1 – Décembre 2017. Disponible sur : <https://aluminium-stewardship.org/wp-content/uploads/2021/02/Norme-de-la-Chaine-de-Trac%CC%A7abilité%CC%81-ASI-V1-Dec2017.pdf>
- [13] Zhu, P., Zhang, L., Wang, Y., Li, J., & Huang, B. (2022). *Direct reuse of aluminium and copper current collectors from spent lithium-ion batteries*. arXiv preprint [arXiv:2210.07678](https://arxiv.org/abs/2210.07678).
- [14] Dasaklis, T. K., Casino, F., Patsakis, C., & Michalopoulos, D. (2020). *A traceability and auditing framework for electronic equipment reverse logistics based on blockchain*. arXiv preprint [arXiv:2005.11556](https://arxiv.org/abs/2005.11556).