

Éco-conception appliquée aux composants passifs de puissance (fusibles et bus bars)

Théo DUCLOS¹, Laetitia MILLEE², Thomas FOUET¹

¹MERSEN Pontarlier, 6 rue Claude Chappe, 25300 PONTARLIER, France

²MERSEN France SB, 15 rue Vaucanson, 69720 SAINT-BONNET-DE-MURE, France

RESUME – Ce travail d'éco-conception utilise l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) pour évaluer l'impact environnemental de composants passifs : bus bars laminés et fusibles, en analysant chaque phase du cycle de vie des composants, de l'extraction des matières premières à la fin de vie. Les résultats révèlent l'importance de la phase d'utilisation, principalement en raison des pertes énergétiques liées à l'échauffement des composants. Le travail réalisé met en évidence différents leviers d'amélioration, en se concentrant sur l'optimisation du poids des produits et les pertes en utilisation. Il est alors montré que, dans le cadre d'une approche d'éco-conception, réduire le poids d'un composant est bénéfique dans certains cas, mais peut aussi amener à une augmentation significative de l'impact environnemental.

Bus bar, Fusible, Eco-conception, Analyse du Cycle de Vie

1. ÉTAT DE L'ART DE L'ECO-CONCEPTION DANS LE DOMAINE DES COMPOSANTS PASSIF DE PUISSANCE

Dans un contexte de transition énergétique et de développement durable, l'industrie doit réduire son impact écologique. L'éco-conception, qui intègre les critères environnementaux dès la phase de conception des produits, est donc un élément majeur pour atteindre cet objectif. Dans ce cadre, l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) est un outil puissant pour évaluer et améliorer les performances environnementales des produits électroniques [1], y compris pour les composants passifs de puissance tel que les fusibles ou les bus bars laminés.

L'état de l'art montre que plusieurs travaux récents ont porté sur la durabilité ou l'écoconception dans l'électronique de puissance, avec l'ACV comme outils de mesure privilégié [2][3]. Ces articles montrent de façon pertinente la forte activité autour des sujets d'éco-conception dans l'électronique de puissance, tout en mettant en évidence le manque de données dans les bases dédiées, ou les manques en termes de réparabilité ou de filières dédiées au recyclage. D'autres articles se concentrent par exemple sur les défis qu'offrent l'intégration des critères d'éco-conception dans la conception de systèmes de conversion [4].

Alors que l'impact environnemental de l'électronique de puissance dans son ensemble est très regardé, il n'en est pas de même pour les composants passifs, dont l'impact environnemental est souvent négligé.

Le présent article se propose d'investiguer l'impact environnemental de différents composants passifs (protection

électrique et bus bars), en mettant en évidence les leviers principaux pour des produits éco-conçus.

2. L'ACV, UN OUTIL DE MESURE

La littérature recense 12 catégories d'outils permettant de faciliter la démarche d'éco-conception [5]. Parmi ces outils, le guide d'éco-conception, le score unique ou la check-list sont des méthodes pertinentes et complémentaires. Mais la méthode privilégiée pour évaluer les impacts environnementaux de l'extraction des matières à la fin de vie des composants passifs est l'ACV. Cette analyse permet de mieux comprendre les points critiques et d'identifier les actions correctives à adopter pour réduire l'impact environnemental global.

2.1. Déroulement d'une ACV

La réalisation d'une ACV doit suivre une méthodologie précise et transparente. Plusieurs normes offrent à ce titre des recommandations générales pour conduire une ACV [6][7].

L'ACV prend en compte toutes les phases du cycle de vie des produits : extraction des matériaux, fabrication des composants, transports (composants, produit), assemblage des produits, utilisation du produit pendant toute sa durée de vie et enfin la fin de vie du produit [8].

La donnée d'entrée principale est la nomenclature du produit qui liste le poids de chaque composant, incluant les informations sur la constitution des matériaux, les lieux de fabrication et le process. Puis il faut prendre en compte l'énergie consommée et les déchets occasionnés lors de la fabrication. Enfin, un travail est nécessaire avec les utilisateurs finaux des produits pour connaître les lieux de distribution et les informations d'utilisation pendant la durée de vie du produit.

La dernière étape du cycle de vie tient compte de la fin de vie du produit. Aujourd'hui les données disponibles sont présentes dans les bases de données mais restent très génériques. Certains process de traitement de nos produits ne sont pas industrialisés ou inexistant pour optimiser la revalorisation des matériaux constituant nos produits.

Une fois l'inventaire du cycle de vie terminé, le logiciel EIME est utilisé pour réaliser les ACV, avec les bases de données CODDE et ESR (pour la fin de vie, notamment). Le logiciel permet de faire les calculs par impact environnemental, par phase de cycle de vie ou par composant.

2.2. Cas de l'analyse ACV d'un bus bar laminé

Les bus bars laminés peuvent être considérés comme des circuits de puissance, servant par exemple à connecter différents composants de puissance [9]. Ils sont composés d'un assemblage de couches conductrices et isolantes (Figure 1).



Fig. 1. Exemple de bus bar laminé

Pour cette publication, l'ACV d'un bus bar représentatif a été réalisée. Le produit, de grande dimension (env. 500x1000mm), a un poids total de 42,9kg, dont 94% correspond aux conducteurs en cuivre (d'épaisseur 1,5mm).

Les résultats ont permis de quantifier l'impact environnemental du produit, non négligeable : 5 235 kg CO₂ eq. sur la durée de vie du produit. D'autres indicateurs ont été analysés, mais ne sont pas présentés dans ce résumé.

Dans le détail, l'ACV a mis en évidence l'impact environnemental majeur de la phase d'utilisation, comme le montre la Table 1, indiquant l'impact sur le climat en fonction des différentes étapes de la vie du produit.

Tableau 1. Répartition de l'impact environnemental entre les différentes étapes de la vie du bus bar

Etape du cycle de vie	Indicateur Changement climatique	
	(kg CO ₂ eq)	(%)
Fabrication	100	1,92
Distribution	4,9	0,09
Installation	0	0
Utilisation	5 030	96,01
Fin de vie	96	1,83

Cela s'explique par la dissipation thermique engendrée par le passage du courant dans le bus bar en utilisation. Les pertes par effet joule sont non négligeables. Le courant traversant le bus bar entraînant une élévation de température maximale de 14,0°C, déterminé par simulation thermoélectrique avec le logiciel COMSOL Multiphysics. Cela représente tout de même 14,2MWh de pertes pendant la vie du produit.

L'ACV s'appuie sur de nombreux indicateurs autres que le réchauffement climatique (en kg CO₂ eq). En effet, l'impact des produits et de leur utilisation est multiple : acidification, eutrophisation des sols et des milieux marins, écotoxicité, etc ...

La Figure 2 montre l'impact du produit lors de son cycle de vie, en tenant compte de 6 facteurs différents, définies par la méthode PEF [10]. Ces facteurs présentés sont respectivement l'acidification (PEF-AP), le changement climatique (PEF-GWP), l'écotoxicité d'eaux douces (PEF-CTUe), l'eutrophisation d'eau douce (PEF-Epf) et marine (PEF-Epm) et enfin l'épuisement des ressources minérales et métaux (PEF-ADPe).

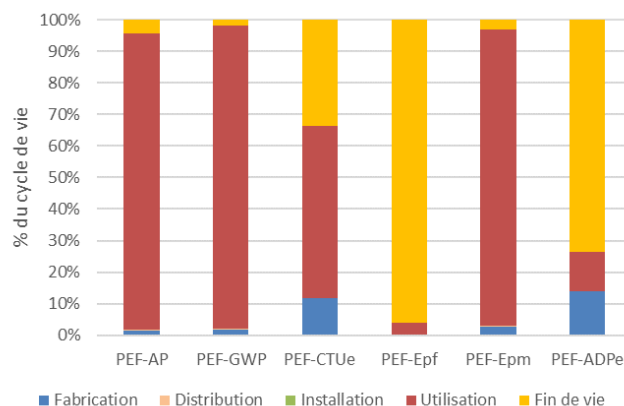


Fig. 2. Comparaison de l'impact de plusieurs indicateurs lors des différentes phases de la vie du bus bar laminé

Dans une majorité des indicateurs, dont le réchauffement climatique, la phase d'utilisation est de très loin la plus impactante. Cependant, la phase de fin de vie a l'impact le plus important pour l'indicateur d'eutrophisation d'eaux douces (PEF-Epf) et l'épuisement des métaux (PEF-ADPe). Cela est expliqué par la phase de recyclage du cuivre.

Outre l'impact lié au recyclage, la phase de fin de vie a également révélé des risques liés au carton (emballages) et aux adhésifs utilisés, pouvant entraîner la libération de substances nocives affectant la santé humaine et les écosystèmes.

Cette étude a permis d'identifier des leviers d'amélioration, tels que l'optimisation de l'efficacité énergétique du bus bar et le recours à des pratiques de recyclage plus durables, pour rendre le bus bar plus respectueux de l'environnement tout au long de son cycle de vie. Élément essentiel de l'écoconception, cette méthodologie est duplicable à l'ensemble des développements de composants passifs de puissance.

3. LES DEFIS DE L'ECO-CONCEPTION DANS LES COMPOSANTS PASSIFS DE PUISSANCE

Parmi les actions possibles lors de l'éco-conception d'un produit, réduire le poids des composants et la quantité de matière est intuitivement un axe d'amélioration efficace.

3.1. Gain de poids sur les appareillages fusibles

Comme présenté précédemment, bien qu'il s'agisse de composants passifs, ceux-ci sont lourdement impactés par la phase utilisation car ils dissipent beaucoup et ont une durée de vie importante : 20 ans pour les fusibles et appareillages fusibles.

Cependant cette réalité est un peu moins vraie sur les appareillages fusibles qui ont une puissance dissipée moins importante. La diminution du poids des produits devient alors un vrai enjeu qui est impactant sur le résultat global de l'empreinte carbone notamment.

Des travaux ont été menés pour éco-concevoir des appareillages fusibles, tout en se servant de l'ACV comme outils de mesure de l'impact environnemental. La Figure 3 présente une vue en coupe d'un appareillage fusible (a) et de son évolution éco-conçue (b).



Fig. 3. Appareillage fusible (a) et sa version éco-conçue (b)

Alors que le produit initial pèse 63g, la version éco-conçue ne fait plus que 46g (26% de réduction de poids), grâce à une optimisation des formes plastiques et métalliques. L'impact est de 22% de réduction de kg de CO₂ éq par rapport à la phase d'extraction des matériaux (à mettre en perspective avec 4 Millions de produits fabriqués par an pour la société Mersen, soit une réduction de 356T de CO₂ éq ou encore 22T de cuivre extrait en moins).

Cet exemple montre qu'il est possible de réduire l'impact environnemental des composants de protection électrique, par optimisation du design, tout en ayant des performances électriques équivalentes.

3.2. Gain de poids sur un fusible

Réduire le poids d'un produit n'est pas toujours pertinent dans le cadre de l'éco-conception. En voulant faire le même exercice sur un fusible, une conclusion toute différente a été obtenue.

L'objectif premier était de réduire le poids du fusible, en utilisant la même méthodologie que pour les appareillages.

Un fusible de puissance est constitué principalement de céramique, de sable et de plots métalliques (Figure 4).



Fig. 4. Exemple de fusible de puissance, avec corps céramique

La démarche d'optimisation du poids du fusible a été concluante, en passant de 920g à 810g soit un gain de 12%. Cela a donc contribué à amélioration des impacts de l'épuisement des matières premières (50%) et de la production de déchets dangereux (16%). Cependant dans le même temps, la puissance dissipée du fusible a augmenté de 3300 MJ à 3600 MJ sur 20 ans d'utilisation, ce qui a pour conséquence une augmentation de l'impact du réchauffement climatique de 8% de kg CO₂ éq sur le bilan global après modifications.

Avant d'entreprendre les actions de gain de matières, il faut donc bien comprendre les influences des modifications sur le design et ses conséquences sur les différents impacts et ainsi éviter le transfert des impacts.

3.3. Réduction de l'impact de l'utilisation

Comme l'a montré les exemples précédents, réduire la quantité de matière utilisée dans les produits peut avoir un impact bénéfique sur l'environnement, mais ce n'est pas toujours le cas. En particulier lorsque les composants de puissance sont traversés par de forts courants, comme les bus bars laminés, où la phase d'utilisation est prédominante lorsque l'on analyse l'impact environnemental du produit.

En reprenant l'exemple du bus bar laminé présenté en première partie (conducteurs en cuivre de 1,5mm d'épaisseur), il peut être montré qu'augmenter l'épaisseur des conducteurs peut amener à une réduction significative de l'impact climatique.

Le bus bar laminé développé est composé de plusieurs sous-ensembles assemblés les uns les autres, formant un ensemble de taille conséquente (1350x800mm). Chaque sous-ensemble est composé de 2 conducteurs, isolés les uns les autres par un film diélectrique (Figure 5). L'application visée est liée aux énergies renouvelables (éolien), avec une durée de vie espérée de 30 ans.

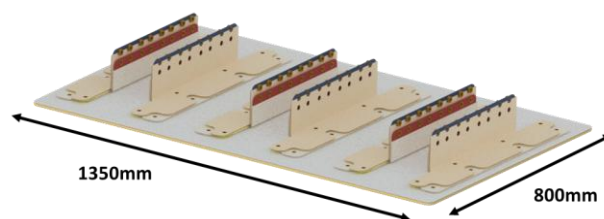


Fig. 5. Bus bar laminé pour une application de conversion de puissance pour l'éolien

Les composants bus bars distribuent le courant entre différents points, mais avec des densités de courant non homogènes. Cela induit des points chauds, où les pertes par effet Joule peuvent être importantes. Ces pertes sont déterminées par simulation thermoélectrique, en utilisant le logiciel Comsol Multiphysics (Figure 6).

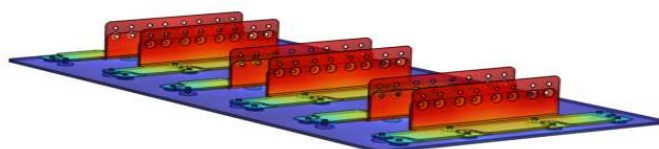


Fig. 6. Simulation thermoélectrique de l'échauffement d'un bus bar laminé (épaisseur 1,5mm) lors d'un passage de courant nominal

Ainsi, augmenter l'épaisseur des conducteurs permettra de limiter la dissipation par effet Joule, et donc les pertes pendant l'utilisation. Une étude comparative à différentes épaisseurs est présentée dans le Tableau 2.

Tableau 2. Comparaison de l'impact sur le climat de bus bars laminés de différentes épaisseurs

Epaisseur des conducteurs (mm)	1,5mm	2,0mm	2,5mm
Poids du bus bar (kg)	42,9	53,1	71,1
Echauffement max. du produit en utilisation (°C)	14°C	9,5°C	6,8°C

Impact climatique (kg Co2 éq)	5 235	4 020	3 330
----------------------------------	-------	-------	-------

Ces résultats montrent un impact très significatif de l'épaisseur des conducteurs, ce qui peut constituer un levier intéressant dans le cadre de l'éco-conception des bus bars laminés.

Pour aller plus loin dans l'analyse, la Figure 7 présente un comparatif entre les 3 épaisseurs de cuivre, pour les 6 indicateurs étudiés, l'épaisseur 1,5mm étant prise en référence.

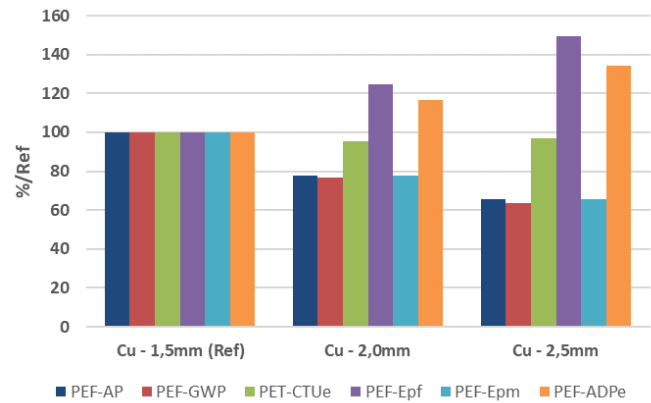


Fig. 7. Comparatif de l'impact de l'évolution de l'épaisseur des conducteurs sur 6 indicateurs d'impact climatique

Cette comparaison montre que selon l'indicateur étudié, augmenter l'épaisseur aura tantôt un impact positif (acidification, réchauffement climatique ou eutrophisation marine), ou un impact négatif (eutrophisation d'eau douce ou épuisement des ressources minérales et métaux). Ce résultat montre de façon évidente que l'éco-conception nécessite de prendre en considération plusieurs indicateurs en même temps, mais aussi les transferts d'impacts.

Le cuivre étant un matériau particulièrement dense, une alternative également étudiée est le passage à l'aluminium, permettant de réduire significativement le poids du produit. L'aluminium utilisé pour les bus bars est de nuance 1050, ayant une conductivité d'environ 60% IACS. Cela implique que pour avoir un échauffement équivalent à du cuivre de 1,5mm d'épaisseur, il convient d'utiliser des conducteurs de 2,5mm d'épaisseur. Le Tableau 3 présente le comparatif de quelques données entre un bus bar en cuivre (1,5mm d'épaisseur) et son équivalent en aluminium (2,5mm d'épaisseur). Il montre que pour un échauffement équivalent, l'aluminium permet à la fois une réduction très significative du poids du bus bar, tout en réduisant l'impact sur le réchauffement climatique, passant de 5,2 T éq. CO2 à 4,7 T, soit une réduction de 10%.

Tableau 3. Comparaison de l'impact sur le climat de bus bars laminés en cuivre et en aluminium

Nature et épaisseur des conducteurs (mm)	Cuivre 1,5mm	Aluminium 2,5mm
Poids du bus bar (kg)	42,9	25,8
Echauffement max. du produit en utilisation (°C)	14°C	13,8°C
Impact climatique (kg Co2 éq)	5 235	4 730

La Figure 8 présente le comparatif des 6 indicateurs entre le bus bar en cuivre et en aluminium. Elle montre que pour l'ensemble des indicateurs, le passage à l'aluminium a un impact positif, voire très positif.

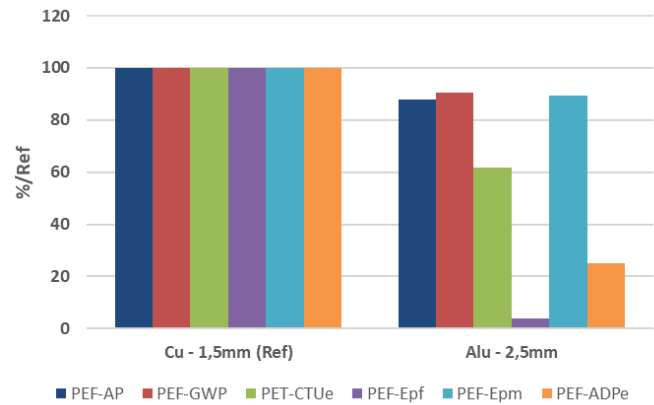


Fig. 8. Comparatif de l'impact de la matière et l'épaisseur d'un bus bar sur 6 indicateurs d'impact climatique

Cette étude montre que l'impact environnemental d'un produit tel que les bus bars peut être amélioré en jouant sur les épaisseurs de conducteurs, afin de réduire les pertes en utilisation, ou en remplaçant le cuivre par de l'aluminium.

Il est toutefois important d'ajouter que cette étude ne tient pas compte d'autres facteurs tel que le coût du produit. A ce titre, l'augmenter de l'épaisseur des conducteurs en cuivre aura un impact significatif sur le coût du produit. Concernant l'aluminium, ce dernier est un métal plus économique que le cuivre, mais la difficulté de réaliser un traitement anti-corrosif sur ce métal fait que le coût global de la solution est aujourd'hui peu intéressant.

3.4. Prise en compte de la chaîne d'approvisionnement lors de l'éco-conception

L'éco-conception n'est pas qu'une affaire de design. En effet, lorsqu'une étude est lancée toutes les parties prenantes d'un projet sont concernées : depuis le marketing, la R&D, la production, les achats jusqu'aux clients.

Dans le cadre d'une étude pour une application ferroviaire, une ACV a été réalisée sur un capteur de courant (Figure 9).

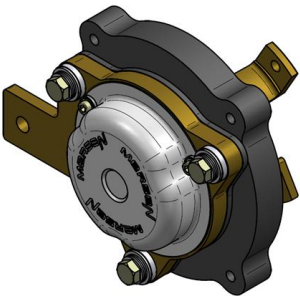


Fig. 9. Capteur de courant pour application ferroviaire, développé par la société Mersen

Cette étude a montré que 76% de l'impact du réchauffement climatique était dû au transport aérien de certains composants. En l'occurrence, certains fournisseurs localisés en Amérique du Sud livrent des composants à

assembler en France par avion. Le produit assemblé est ensuite livré au client (en Afrique du Sud) également par avion. Avec un produit de 8kg et une durée de vie de 18 ans, l'impact de la chaîne d'approvisionnement est la première sur le réchauffement climatique.

Cette étude a permis de mettre en évidence des pistes rapides à mettre en place pour réduire fortement l'impact environnemental lié à la chaîne d'approvisionnement.

4. CONCLUSIONS

L'éco-conception des composants passifs de puissance représente une démarche essentielle pour répondre aux enjeux environnementaux actuels. L'Analyse de Cycle de Vie s'avère être un outil indispensable pour évaluer l'impact écologique des produits. L'amélioration de l'efficacité énergétique passe notamment par l'optimisation du poids des produits, à la baisse dans le cas de composants dissipant peu de chaleur, comme les appareillages, ou à la hausse dans le cas des bus bars laminés. L'éco-conception peut également passer par un changement de matériau. A ce titre, l'aluminium peut être une alternative intéressante au cuivre, Avec un impact positif sur l'ensemble des indicateurs étudiés. Dans le cas du bus bar, il est cependant nécessaire d'avoir une réflexion plus globale du système électrique, où une augmentation de poids, ayant un coût, peut être contrebalancée, par exemple, par un système de refroidissement plus léger, et/ou des économies d'énergies pendant toute la vie du produit.

5. REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient la Commission Européenne pour le financement du projet AdvanSiC, ayant porté une partie de ces résultats, ainsi que les équipes de développement des systèmes de protection électrique et de captage de courant de la société Mersen.

6. REFERENCES

- [1] O. Andersen, John Hille, G. Gilpin, A. S.G. Andrae, « Life Cycle Assessment of Electronics », SusTec 2014, Jan 2014.
- [2] F. Salomez, H. Helbling, M. Almanza, et al., "State of the Art of Research towards Sustainable Power Electronics", Sustainability 2024, 16(5), 2221
- [3] Song, Y.; Wang, B. Survey on Reliability of Power Electronic Systems. IEEE Trans. Power Electron. **2013**, 28, 591–604.
- [4] L. Fang, P. Lefranc, M. Rio, "Barriers for eco-designing corcular Power Electronics Converters", Procedia CIRP, Vol 116, 2023, 287-292
- [5] Article entitled "Guide des 12 catégories d'outils en Eco-conception". Available online: <https://www.eco-conception.fr/articles/h/guide-des-12-categories-d-outils-en-eco-conception.html> (accessed on 20/05/2025)
- [6] ISO 14040:2006; Environmental management, Life Cycle Assessment, Principles and Framework. International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 2006.
- [7] ISO 14044:2006; Environmental management, Life Cycle Assessment, Requirements and guidelines. International Organization for Standardization (ISO): Geneva, Switzerland, 2006.
- [8] Article entitled "Analyse du cycle de vie", <https://www.eco-conception.fr/static/analyse-du-cycle-de-vie-acv.html>, Jan 2025.
- [9] Prashant B.T. et al., « Extensive review on Laminated bus bar for low and high power applications », E3S Web of Conferences, 87:01009, Jan 2019
- [10] Article entitled "Tout comprendre à la méthode PEF", <https://www.waro.io/blog/product-environmental-footprint-pef> (Accessed May 2025)