

Analyse du cycle de vie du stator d'une machine électrique de forte puissance

Amidou COULIBALY^{1,2}, Maxime PLOYARD¹, Hugo HELBLING², Aymen AMMAR¹, Abdelmounaim TOUNZI³, Abdelkader BENABOU³

¹ Jeumont Electric, 367 Rue de l'Industrie, Jeumont F-59460, France

² Université Claude Bernard Lyon 1, Ampère, UMR5005, INSA Lyon, École Centrale de Lyon, CNRS, Villeurbanne, F-69100, France

³ L2EP, Univ. Lille, Arts et Métiers Institute of Technology, Centrale Lille, Junia, ULR 2697 - L2EP, Lille, France.

RESUME - Cet article présente une étude complète de l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) du stator d'une machine électrique de forte puissance (6,5 MW), réalisée à partir de données industrielles réelles et modélisée sous Brightway2 avec la base Ecoinvent 3.8 et la méthode Environmental Footprint 3.1. L'inventaire couvre les phases de fabrication, d'usage (service continu S1 sur 30 ans) et de fin de vie, avec plusieurs scénarios comparatifs (charge intermittente, mix électrique européen, réduction des pertes, incorporation de matériaux recyclés selon deux méthodologies). Les résultats révèlent que la phase d'usage domine l'empreinte environnementale, en particulier pour le changement climatique, l'épuisement des ressources non renouvelables et la toxicité humaine. Les impacts de la fabrication sont plus modérés mais restent significatifs pour les ressources matérielles, tandis que la fin de vie apparaît comme le levier le plus prometteur pour réduire les besoins en matières premières vierges, surtout lorsque l'on intègre un contenu recyclé élevé. Enfin, l'étude met en lumière deux axes prioritaires d'éco-conception : (1) l'amélioration du rendement énergétique via l'utilisation de tôles magnétiques à faibles pertes, et (2) l'optimisation des boucles de recyclage en fin de vie. Ces pistes, associées à une modélisation plus fine des procédés industriels et des scénarios de valorisation, ouvrent la voie à des machines électriques plus durables, dès leur phase de conception.

Mots-clés – « Machines électriques », « Analyse sur Cycle de Vie », « Eco-conception »

1. INTRODUCTION

Les systèmes énergétiques sont des éléments clés dans le contexte des enjeux environnementaux (émissions de gaz à effets de serre, disponibilité des ressources naturelles, etc.) et de la transition énergétique (efficacité énergétique). Les machines n'y échappent pas puisqu'elles représentent une part importante de l'énergie consommée dans le monde, qu'elles peuvent être composées de matériaux critiques, comme le cuivre et les terres rares (machines à aimants permanents). Il est de ce fait nécessaire de s'intéresser à l'évaluation des impacts environnementaux des machines électriques et à la réduction de ces derniers sur l'ensemble du cycle de vie.

Ce papier s'intéresse principalement à l'évaluation et l'analyse des impacts environnementaux associés au stator d'une machine électrique de forte puissance. La méthodologie utilisée pour effectuer l'Analyse du Cycle de Vie (ACV) est dans un premier temps expliquée puis

les résultats selon différents scénarios seront présentés et discutés.

2. METHODOLOGIE

La méthode d'Analyse du Cycle de Vie est une méthode normée (norme ISO14040 : 2006) [1] visant à l'évaluation des impacts environnementaux potentiels sur le cycle de vie d'un produit ou d'un système. Elle s'effectue en quatre étapes, Figure 1. La description de cette partie va suivre la structure de ces dites quatre étapes.

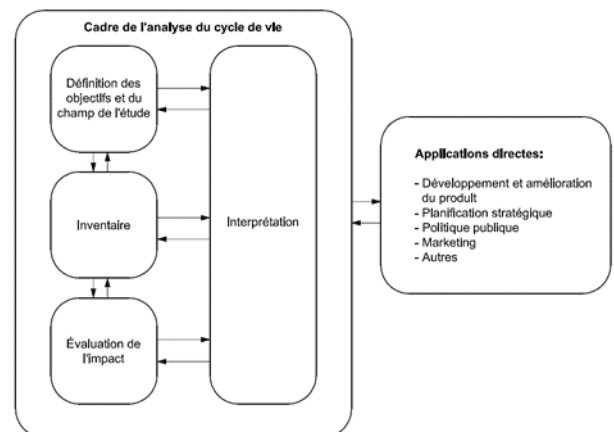


Fig. 1. Phases du cycle de vie [norme ISO14040 : 2006]

2.1. Définition des objectifs et du champ de l'étude

Le système considéré pour ce travail est un stator de machine électrique industrielle de forte puissance 6,5 MW. Le stator est constitué de tôles d'acier électrique de grade M600-65A (soit 6 W/kg de pertes spécifiques à 1.5T et 50Hz) dont l'isolation est assurée par un procédé interne de l'entreprise, de cuivre, de matériaux isolants, de matières plastiques mais également d'acier pour les joues de serrage. Les phases du cycle de vie considérées sont la phase de fabrication (matières utilisées et procédés d'assemblages), la phase d'utilisation (durée de vie avec un service de fonctionnement défini et pertes énergétiques associées sur la durée de vie) et la fin de vie. Le détail de la modélisation pour chacune de ces phases est donné ci-dessous. L'objectif est d'évaluer l'impact environnemental de ce stator selon plusieurs scénarios de fonctionnement (durée vie, service) et de fin de vie, et

d'analyser les points les plus impactant sur le cycle de vie associé.



Fig.2. Image d'un stator en essai de magnétisation [H. Helbling, 2]

2.2. Inventaire du cycle de vie

Comme évoqué précédemment, l'inventaire du cycle de vie du stator comprend les phases de fabrication, d'utilisation et de fin de vie.

2.2.1. Phase de fabrication du stator

Produire un stator nécessite principalement de l'acier, du cuivre, des matériaux isolants, des matières plastiques et des outils industriels adaptés à la production [3]. Par ailleurs, le besoin en matières premières a été dissocié des procédés de fabrication de l'entreprise dans le but de montrer l'impact de chaque brique sur le cycle de vie.

Le circuit magnétique du stator est réalisé à partir de tôles magnétiques isolées à faibles pertes correspondant à des applications spéciales (machines à très haut rendement) pour lesquelles, une isolation minérale des tôles minimise les pertes par courants de Foucault et permet à la tôle de résister à des températures très élevées. Le bobinage est réalisé à partir de fils de cuivre émaillés et guipés, enroulés en navettes, qui seront isolées et mises en forme avant bobinage. Les bobines peuvent recevoir un ruban conducteur et semi-conducteur suivant le niveau de tension de la machine. Après bobinage et réalisation des connexions, le stator est imprégné sous vide sous contrôle permanent des paramètres (pression, temps, température). Le cycle d'imprégnation peut être répété dans le cas de machines à exigences spécifiques. L'imprégnation est suivie d'une polymérisation à température contrôlée [3]. Les procédés et savoir-faire de Jeumont Electric, brièvement introduits, permettent de garantir une qualité optimale du système d'isolation électrique, contribuant ainsi à la fiabilité et à la durabilité des équipements. Ces systèmes sont conçus pour répondre aux exigences des environnements difficiles et aux contraintes sévères, assurant ainsi des performances soutenues sur toute la durée de vie de l'équipement.

En s'appuyant sur la modélisation proposée par de A. Nordelöf et al. [4] et sur les informations

concernant les procédés de fabrication industriels du stator étudié, les différentes étapes nécessaires à la production du stator ont été détaillées sous forme de briques élémentaires (cf. figure 3). L'ensemble de la chaîne de fabrication de l'entreprise a donc été synthétisé en onze étapes principales, de la découpe des tôles jusqu'à l'imprégnation du circuit magnétique, comme on peut l'observer sur la Figure 3.

A partir de cette figure, un inventaire complet est réalisé pour la phase de fabrication, en tenant compte des ressources, des flux entrants et sortants pour chaque étape de la fabrication, depuis le rouleau de toles jusqu'à la dernière étape élémentaire. Ainsi, à titre d'exemple, les figures 4.(a) et 4.(b) représentent les inventaires des flux et de ressources nécessaires pour les phases de découpage et d'imprégnation.

Toujours dans le cadre de l'inventaire du cycle de vie, nous avons calculé les masses de plusieurs éléments constitutifs du stator, tels que les tôles d'acier électrique, les joues de serrage et les isolants, afin de pouvoir les intégrer dans Ecoinvent, où les données sont exprimées en kilogrammes. Ainsi, avec l'aide des dimensions de ces composants, on l'obtient leur masse à travers l'équation:

$$m_{\text{totale}} = V * \rho \quad (\text{kg})$$

Avec V le volume (m^3) et ρ la masse volumique (kg/m^3).

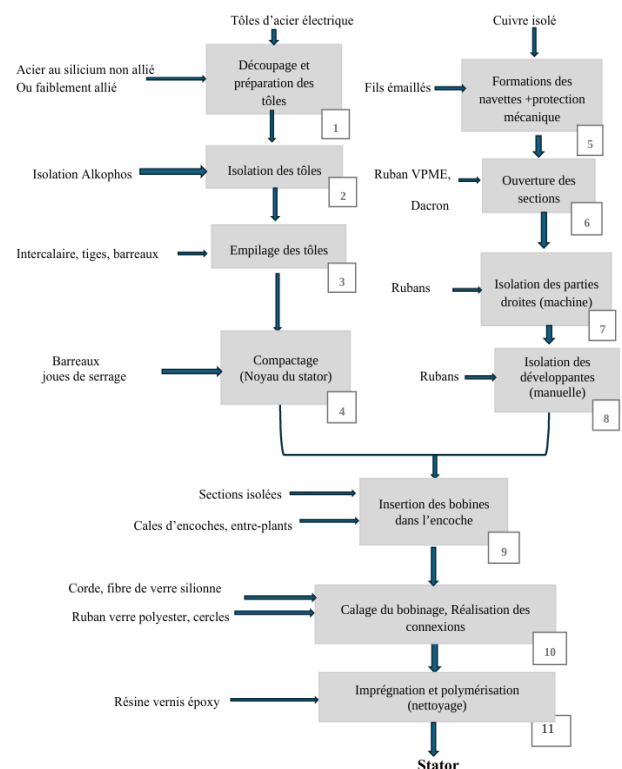


Fig.3.Etapes nécessaires à la fabrication du stator

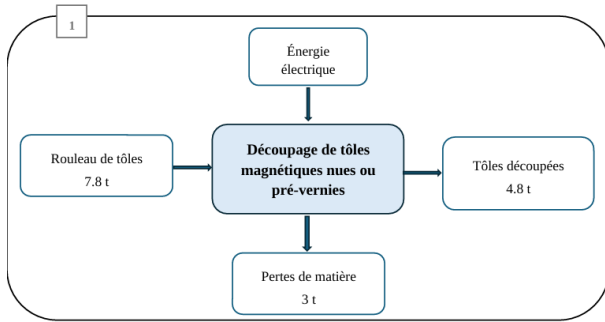


Fig.4 (a). Inventaire du procédé de découpage

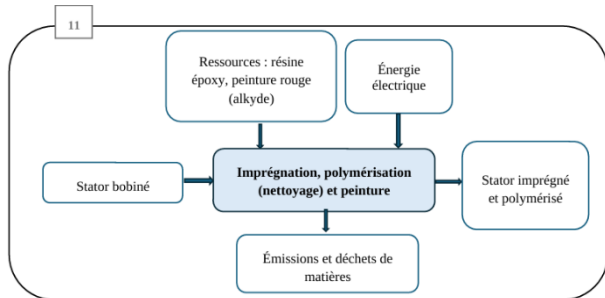


Fig.4 (b). Inventaire du procédé d'imprégnation

2.2.2. Phase de fonctionnement

L'analyse sur cycle de vie requiert une bonne connaissance de la phase d'usage. Dans notre cas d'étude, les hypothèses de cette phase sont les suivantes :

- Taux d'utilisation de la machine : Service continu à charge nominale (S1)
- Durée de vie : fonctionnement pendant 30 ans (ce qui correspond à 262800 heures de fonctionnement).

Service continu - Service type S1 : fonctionnement à charge constante nominale d'une durée suffisante pour que l'équilibre thermique soit atteint. Les paramètres de service sont le facteur de marche ($F = 1$) et le nombre de démarrages équivalent par heure ($c \leq 6$) [5].

Les données des différentes pertes ont été fournies par l'industriel fabricant de la machine. On ne retiendra que les pertes au niveau du stator pour notre cas d'étude. Le tableau ci-dessous regroupe les différentes pertes en considérant la tôle M600-65A.

Tableau 1 : Pertes au niveau du stator

Pertes Joules du stator	39 kW
Pertes fer	54.3 kW
Autres pertes	32.5 kW

Grace au rendement de la machine et en s'appuyant sur le bilan des pertes du stator, l'énergie totale perdue pendant sa durée de vie est calculée selon la formule suivante :

$$E_{\text{perdue}} = P_{\text{pertes}} * t_{\text{vie}} \quad (\text{kWh})$$

Où P_{pertes} est la puissance totale des pertes au niveau du stator et t_{vie} est la durée de fonctionnement cumulée de la machine.

2.2.3. Phase de fin de vie

La fin de vie du stator est modélisée selon deux approches :

1. Méthode d'attribution standard

Les impacts liés au recyclage sont directement alloués à la phase matière : si 40 % de l'acier est issu du recyclage, on considère alors que 40 % de la matière première provient d'acier recyclé et 60 % d'acier primaire. Le scénario de référence reste fixé à 100 % d'acier primaire, et les différences observées lorsque l'on introduit de l'acier recyclé traduisent les crédits environnementaux associés à la fin de vie. Cela est aussi valable pour le cuivre.

2. Méthode différenciée selon la nature de la matière

On distingue la « matière utile », c'est-à-dire celle intégrée dans le stator (aciers et cuivres entourés d'isolants ou d'autres co-produits qui compliquent le recyclage), de la « matière perdue » issue des chutes de production (tôles d'acier nues, cuivre nu, facilement valorisables).

- Pour la matière utile, nous avons retenu un taux de recyclage de 60 % pour l'acier et de 70 % pour le cuivre, reflétant les difficultés liées aux isolants et aux traitements préalables.
- Pour la matière perdue, ces taux passent à 80 % pour l'acier nu et à 90 % pour le cuivre nu, du fait de l'absence de contaminants.

Le complément (respectivement 40 % et 30 % pour l'acier et le cuivre utile, ou 20 % et 10 % pour la matière perdue) est considéré comme non recyclé, et ses impacts sont alloués à l'approvisionnement en matière première vierge.

Ces taux de recyclage proviennent de rapports et de documents de l'Institut National de l'Économie Circulaire qui considère que le taux moyen de recyclage de l'acier en France est estimé à 78 % [6] et de l'ADEME selon qui environ 45% du cuivre utilisé en France provient du recyclage [7]. D'autre part, selon les anciennes estimations [3], le pourcentage de recyclage du cuivre s'élevait à 70% avant 2012 et aurait atteint 90% selon certaines sources récentes [8]. Ce pourcentage élevé concerne surtout les infrastructures civiles.

Ces valeurs de recyclage sont ensuite associées à l'énergie dans Brightway2 Activity Browser. Ainsi, du point de vue énergétique, le recyclage du cuivre est nettement moins énergivore que sa production primaire. Recycler 1 kg de cuivre nécessite entre 20 et 25 MJ (soit environ 5,55 à 7 kWh), contre 105–110 MJ/kg (29–31 kWh/kg), ce qui signifie que le recyclage n'utilise qu'environ un quart de l'énergie de la voie minière – une économie de l'ordre de 80–85 % par rapport à la production primaire. Concernant l'acier, l'énergie

nécessaire pour recycler 1 kg est d'environ de 8.6 MJ (2.4 kWh), tandis que la production primaire peut dépasser 20 MJ/kg, selon le procédé utilisé (haut fourneau ou four à arc électrique) [9 - 10].

2.3. Evaluation des impacts environnementaux

Une fois l'inventaire effectué, l'évaluation des impacts environnementaux est réalisée sur notre stator de référence en ne considérant aucun traitement de fin de vie. Pour traduire l'inventaire matière et énergie en données environnementales exploitables, nous avons suivi un protocole séquentiel. Nous avons d'abord choisi la base de données Ecoinvent 3.8 (cut-off, v3.8) pour sa couverture étendue des procédés industriels, notamment les process de recyclage des métaux, et pour l'actualisation des données d'entrée relatives à la production d'électricité nucléaire et thermique en Europe. Les inventaires collectés ont ensuite été intégrés dans Brightway2 Activity Browser (v2.9.7), un framework open-source en Python, permettant de modéliser les chaînes de production, d'affecter les flux d'inventaire aux activités correspondantes d'Ecoinvent et de calculer automatiquement les scores d'impact. La méthode Environmental Footprint 3.1 [European Platform on LCA] de la Commission européenne a été appliquée pour évaluer trois critères clés : le changement climatique (GWP sur 100 ans), l'épuisement des ressources non renouvelables, la toxicité humaine et les ressources matérielles, choisis pour leur pertinence et leur comparabilité au sein du référentiel européen. L'unité fonctionnelle retenue est l'heure de service continu à charge nominale, et les résultats ont été normalisés par rapport à la moyenne annuelle européenne afin de mesurer la contribution relative de chaque phase du cycle de vie. Concrètement, cette séquence comprend : (1) le chargement des masses et des flux d'énergie mesurés, (2) leur affectation aux activités Ecoinvent adéquates, (3) l'application de la méthode EF 3.1, puis (4) l'extraction et l'export des indicateurs clés pour chaque catégorie d'impact.

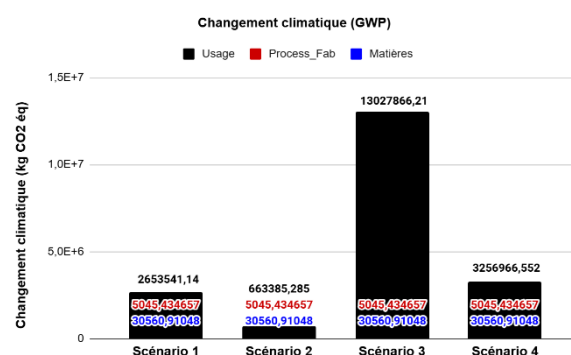
NB : Certaines données n'ont pas pu être obtenues pour réaliser une ACV précise. Toutefois, des hypothèses ont été utilisées pour estimer ces valeurs manquantes. Ainsi, pour certaines étapes du processus de fabrication du stator, la consommation d'énergie a été estimée en multipliant la puissance nominale de la machine utilisée pour réaliser l'étape concernée par sa durée d'utilisation.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

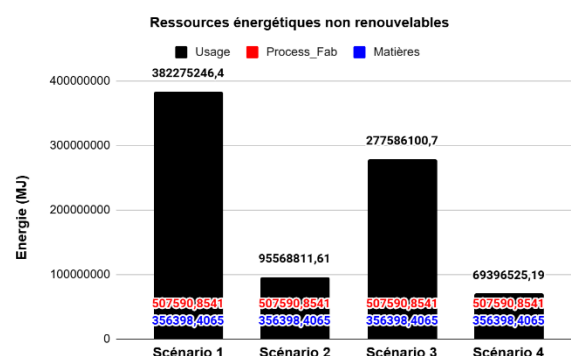
La modélisation a été réalisée considérant plusieurs scénarios. Les différents scénarios développés pour l'étude ont été regroupés et synthétisés dans le tableau 2 afin de faciliter la comparaison de leurs hypothèses et de leurs impacts. On considère le scénario 1 comme scénario de référence.

Tableau 2 : Scénarios définis pour l'ACV

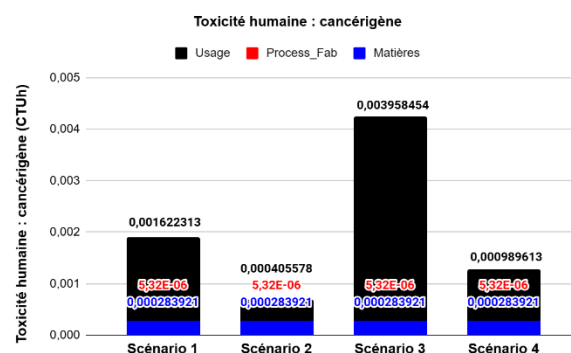
Scénario	Usage	Durée	Fin de vie	Mix électrique
1. Continu en France	Continu S1	30 ans	Non	France
2. Partiel en France	Intermittent (25%)	30 ans	Non	France
3. Continu en Europe	Continu S1	30 ans	Non	Europe
4. Partiel en Europe	Intermittent (25%)	30 ans	Non	Europe
5. Continu avec pertes réduites	Continu S1 avec pertes réduites	30 ans	Non	France
6. Continu en France avec fin de vie (méthode 1)	Continu S1	30 ans	Oui	France
7. Continu en France avec fin de vie (méthode 2)	Continu S1	30 ans	Oui	France



(a)



(b)



(c)

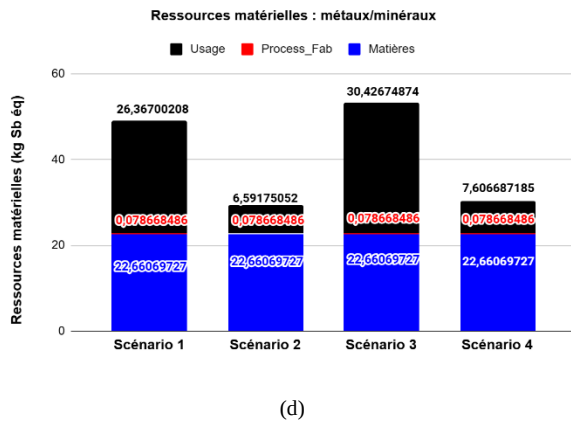


Fig.5. ACV du stator selon différents critères et scénarios

L'analyse de la **figure 5(a-d)** permet de dégager des points de repère pour les quatre premiers scénarios de l'ACV d'un stator. L'impact de la phase d'usage, directement lié à l'énergie perdue, est très important pour tous les scénarios dans la majorité des critères (le changement climatique, l'épuisement des ressources non renouvelables et la toxicité humaine). Comme on pouvait l'espérer, les matières (fils de cuivres et tôles d'acier) ont un impact notable sur les ressources matérielles, dans tous les scénarios étudiés. Le coût environnemental de la phase de construction est minime par rapport aux autres. Ainsi, pour une utilisation longue, l'amélioration de l'efficacité énergétique des machines est le moyen le plus efficace d'améliorer globalement les impacts environnementaux produits. Toutefois, dans le cas des services intermittents ou temporels avec, par exemple, un facteur de marche de 25%, le temps de fonctionnement cumulé des moteurs est réduit à 65700 h, ce qui diminue l'impact de la phase d'usage, comme on peut le voir sur les scénarios 2 et 4.

Les résultats du scénario 3 affichent les mêmes écobilans issus d'ACV pour le scénario 1 (idem pour les scénarios 2 et 4), sauf que le système de production d'électricité est cette fois d'origine européenne, qui représente une part importante de production thermique. On constate que la phase d'usage devient plus impactante selon tous les critères d'impacts retenus lorsque la machine consomme de l'électricité européen, à l'exception de l'épuisement des ressources non renouvelables. En effet, la production d'énergie d'origine nucléaire (en France) limite la consommation en ressources fossiles et diminue la production de CO₂. Néanmoins, il convient de noter que les critères environnementaux classiquement utilisés en ACV n'incluent pas les aspects tels que la sûreté nucléaire et le stockage à très long terme des déchets nucléaires.

Scénario 5 : dans ce scénario, nous considérons les memes conditions que le scénario de référence, mais avec des pertes réduites. Ainsi, la tôle de grade M600 (6 W/kg), est remplacée par une tôle M250 (2,5 W/kg). En supposant une masse constante et des propriétés magnétiques inchangées, la règle de proportionnalité

implique une réduction des pertes fer de 54,3 kW à environ 21,7 kW. En conservant les pertes joules statoriques (39 kW) et les pertes parasites (32,5 kW), les pertes totales du stator sont ainsi réduites de 125,8 kW à environ 93,2 kW, soit une économie de près de 26 % sur le bilan global. Nous faisons ensuite une analyse du cycle de vie comparative entre le scénario 5 et le scénario de référence (scénario 1). La **figure 6** met en évidence des bénéfices environnementaux significatifs liés à l'adoption de la tôle M250. En effet, tous les indicateurs étudiés — changement climatique, consommation d'énergie non renouvelable, toxicité humaine et consommation de ressources matérielles — montrent une baisse d'environ 26 %. Cette amélioration est directement liée à la diminution des pertes dans le stator grâce à un matériau magnétique plus performant, ce qui se traduit par une consommation énergétique réduite sur l'ensemble du cycle de vie de la machine.

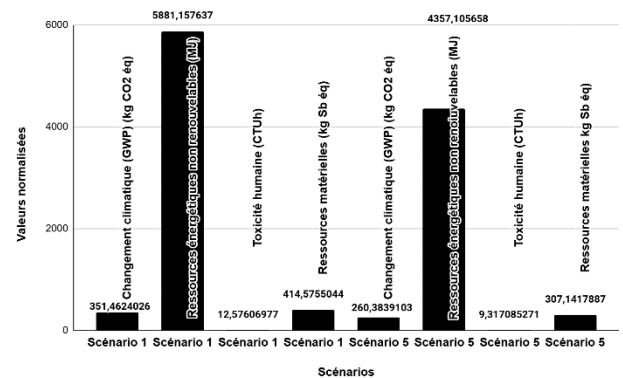


Fig.6. ACV comparative – Scénarios 1&5

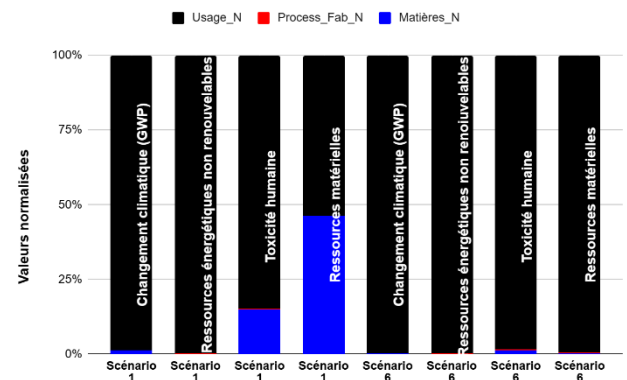


Fig.7. ACV comparative – Scénarios 1&6

Scénario 6 : Nous intégrons désormais la phase de fin de vie du stator (scénario 6) selon la méthode d'attribution standard afin d'évaluer le potentiel des matières recyclées sur l'empreinte environnementale. La comparaison entre le scénario 1 (fabrication classique) et le scénario 6 (avec contenu recyclé) sur la **figure 7**, révèle que l'incorporation de matériaux recyclés n'impacte que marginalement les indicateurs liés à la phase d'usage (changement climatique et consommation d'énergie, toujours dominants). Mais cela entraîne une réduction significative de l'impact "matières" au cycle de

vie. En particulier, l'indicateur « ressources matérielles » baisse de près de 50 %, illustrant le moindre recours aux matières premières vierges. Cette approche diminue également la toxicité humaine et la consommation de ressources non renouvelables liées à la fabrication, sans altérer la performance fonctionnelle de la machine.

scénario 7 : La fin de vie pourrait aussi être modélisée selon la méthode 2 (méthode différenciée selon la nature de la matière). Dans ce cas, il faut noter que 70% du cuivre et 60% de l'acier sont considérés recyclés en fin de vie selon les sources citées plus haut, ce qui explique la faible part de la fin de vie sur l'écobilan global. Ces taux de recyclage concernent les quantités de cuivre et d'acier utiles. Pour ce qui est des quantités perdues, les taux de recyclage seront légèrement meilleurs, du fait de l'absence d'isolants (tôles d'acier nues, cuivre nu). Le taux de recyclage pour l'acier nu a donc été fixé à 80% et celui du cuivre nu à 90%. Les résultats de cette modélisation donnent des valeurs négatives pour certains critères d'impact, traduisant ainsi l'impact positif du recyclage des matières en fin de vie. Le tableau 3 regroupe les valeurs obtenues pour ce scénario.

Tableau 3 : Résultats d'ACV pour le scénario 7

Phase du cycle de vie	Climate change (kg CO2 eq)	Energy resources: non-renewable (MJ)	Human toxicity: carcinogenic (CTUh)	Material resources: (kg Sb eq)
Matières	3,06E+04	3,56E+05	2,84E-04	2,27E+01
Process_Fab	5,05E+03	5,08E+05	5,32E-06	7,87E-02
Usage	2,65E+06	3,82E+08	1,62E-03	2,64E+01
Fin de vie	-1,96E+04	-2,25E+04	-2,01E-04	-1,67E+01

Ces résultats confirment qu'un design optimisé, combinant choix de tôles à plus faible perte (scénario 5) et un taux élevé de recyclé à la fin de vie (scénario 6), permet d'abaisser de façon substantielle l'impact environnemental global du stator, en ciblant à la fois les phases de fabrication et de fin de vie.

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Cette étude a permis de réaliser une analyse approfondie du cycle de vie (ACV) du stator d'une machine électrique de forte puissance, en s'appuyant sur des données industrielles réelles et une modélisation rigoureuse. L'objectif principal était d'identifier les étapes du cycle de vie les plus impactantes d'un point de vue environnemental, afin de guider les efforts futurs d'éco-conception.

Les résultats ont montré que la phase d'usage reste la plus déterminante dans l'empreinte environnementale globale, notamment en termes de changement climatique, d'épuisement des ressources non renouvelables et de toxicité humaine. Toutefois, les phases de fabrication et de fin de vie, bien que moins influentes, offrent également des leviers d'amélioration

importants, notamment par le choix de matériaux à faible impact et l'optimisation des procédés de production.

L'étude met en évidence plusieurs pistes concrètes de réduction des impacts, comme l'utilisation de tôles magnétiques à plus faibles pertes ou l'intégration de matériaux recyclés. Combinées, ces approches peuvent permettre de diminuer significativement l'empreinte environnementale du stator tout en maintenant ses performances techniques.

À court terme, des approfondissements peuvent être menés sur la modélisation fine de certains procédés industriels encore peu documentés, ainsi que sur les scénarios de fin de vie, qui mériteraient d'être élargis à d'autres types de recyclage ou de valorisation. À plus long terme, l'intégration de cette démarche ACV dans la conception dès les premières phases de développement des machines pourrait permettre d'orienter les choix technologiques vers des solutions réellement durables.

En somme, cette étude constitue une base méthodologique robuste pour le développement de pratiques d'éco-conception dans l'industrie des machines électriques, et appelle à une généralisation de ces approches pour accompagner la transition vers une électrification plus respectueuse de l'environnement.

5. REFERENCES

- [1] AFNOR, « NF EN ISO 14040 : Management environnemental, Analyse du cycle de vie », oct. 2006
- [2] H. Helbling : « Etude de l'impact des procédés de fabrication des machines électriques sur les propriétés des noyaux magnétiques », Thèse, Génie électrique, Université de Lille
- [3] W. Boughanmi : « Eco-conception des motorisations électriques : application à la machine asynchrone », Thèse, Génie électrique, Université d'Artois, Béthune
- [4] A. Nordelöf et al.: « A scalable life cycle inventory of an electrical automotive traction machine—Part I: design and composition »
- [5] IEC 60034-1: « Rotating electrical machines. Part 1- Rating and performance », 2004
- [6] Institut National de l'Economie Circulaire, fiche acier, [institut-economie-circulaire-Fiche-Acier.pdf](https://www.institut-economie-circulaire.fr/Fiche-Acier.pdf)
- [7] ADEME, « Bilan national du recyclage 2012-2021 »
- [8] EuRIC AISBL – Recycling: Bridging Circular Economy & Climate Policy « Metal Recycling Factsheet », euric-metal-recycling-factsheet.pdf
- [9] V. Debusschere: « Contributions méthodologiques à l'éco-conception des convertisseurs électromagnétiques d'énergie », Thèse de Doctorat, Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2009
- [10] Techniques de l'ingénieur, « Recyclage du cuivre et environnement », [techniques-ingenieur](https://www.techniques-ingenieur.fr)
- [12] ArcelorMittal, « le recyclage pour stratégie », entretien, 2018
- [13] ADEME « Etude du potentiel d'amélioration du recyclage des métaux en France », 2023
- [14] W. Boughanmi, J. P. Manata, D. Roger, J. F. Brudny: « Éco-conception d'un moteur électrique, Réalisation – Essais », Article, 2012
- [15] V. Debusschere, H. Ben Ahmed, and B. Multon : « Eco-design of Electromagnetic Energy Converters : The case of the electrical transformer »
- [16] B. Cassoret, Jean-paul Manata, Vincent Mallard, Daniel Roger: «Comparative life cycle assessment of induction machines made with copper-cage or aluminium-cage rotors», Article, HAL 2019
- [17] V. Manescu Paltanea, G. Paltanea, et H. Gavrila, « Energy Loss Analysis and Magnetic Properties of Non-Oriented Electrical Steel Cut through Different Technologies », Article, 2015