

# Rotor synchro-reluctant innovant pour la traction automobile dans une chaine de valeur orientée recyclage

Baptiste CHAREYRON<sup>1</sup>, Misa MILOSAVLEVIC<sup>1</sup>, Olivier GUYON<sup>1</sup>, Stéphanie DESROUSSEAU<sup>2</sup>, Gérard DELETTE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> IFP Energies nouvelles, Institut Carnot IFPEN Transports Energie, 1 et 4 avenue de Bois-Préau, 92852 Rueil-Malmaison, France

<sup>2</sup> Univ. Grenoble Alpes, CEA-Liten, F-38000 Grenoble, France

**RESUME**—Cet article s’attache à présenter le développement d’une machine synchro-réductante à aimants permanents, optimisée pour réduire son impact environnemental. Elle s’appuie sur l’aimant issu d’un procédé innovant de fabrication pour faciliter le recyclage et diminuer la consommation de matières critiques par unité de puissance. Pour que l’économie circulaire de l’aimant puisse se développer, un cahier des charges issu du secteur automobile offrant des volumes d’aimants conséquents et un historique du traitement des matériaux en fin de vie des véhicules a été retenu.

**Mots-clés**—Machines électriques, Aimant terres rares, Analyse de Cycle de Vie, Eco-conception, recyclage, terres rares, économie circulaire.

## 1. INTRODUCTION

Dans un contexte d’accélération de l’électrification du secteur automobile visant à réduire l’impact des transports dans les émissions des gaz à effet de serre, la question de l’éco-conception appuyée par l’Analyse de Cycle de Vie (ACV) devient un réel enjeu environnemental et de la résilience nationale à travers de l’économie circulaire. En effet, ces évolutions technologiques des motorisations des véhicules engendrent une consommation accrue des matériaux critiques tel que les terres rares ou le cuivre [1] aussi bien en termes de sécurité d’approvisionnement que de disponibilité. De plus, l’extraction de ces matériaux des mines a un impact délétère sur l’environnement.

Par ailleurs, les feuilles de route du secteur automobile soulèvent plusieurs défis techniques de la motorisation électrique pour améliorer leur compacité, la consommation énergétique et la densité de puissance, que ces matériaux nobles permettent d’atteindre. Pour basculer du modèle actuel vers une boucle plus vertueuse qu’est l’économie circulaire, il devient nécessaire de prendre en compte des aspects d’éco-conception, d’éco-fabrication et d’analyse de cycle de vie.

En reprenant ces principes, l’IFPEN et le CEA-Liten ont engagé ensemble une collaboration pour concevoir une machine électrique innovante limitant les besoins en ressources primaires tout en respectant des contraintes de l’industrie automobile sur les performances pic de la machine (9N.m/kg et 6kW/kg de

parties actives avec moins de 1.6kg d’aimant). La stratégie développée ici vise donc à d’abord réduire le besoin en aimant pour une puissance mécanique délivrée d’une part, et de lever le verrou du recyclage des aimants à travers d’un concept d’intégration permettant sa collecte facilitée en fin de vie.

Une machine synchro-reluctante à aimants permanents (SynRelAP) avec des aimants de formes géométriques non conventionnelles produits par le procédé de fabrication dit netshape (PIM) développé par le CEA, est développée. La synergie entre une topologie à forte reluctance et des aimants de forme à valeur ajoutée issu du recyclage permet une réduction de la consommation de terres rares par l’amélioration de la performance par unité de masse d’aimant consommé et une intégration dans le rotor offrant une extraction en fin de vie en réduisant les pertes.

Dans cet article, nous présenterons les principales lignes guidant le développement de la machine et les performances obtenues en simulation. Puis nous présenterons des résultats sur l’analyse de cycle de vie de la machine électrique.

## 2. DEFINITION DU CAHIER DES CHARGES

Le cahier des charges comprend l’amélioration de la circularité économique de la machine en visant en particulier de garantir la recyclabilité des aimants dans le produit en fin de vie en minimisant les pertes de matière. L’un des principaux défis de cette démarche consiste à garantir les propriétés des matériaux durant le processus de recyclage [2]. Pour cela il est nécessaire de séparer proprement les matériaux présents dans la machine et de disposer des filières dédiées pour les traiter et les valoriser. Dans le cas des aimants terres rares, ces filières sont en construction [3]. Par ailleurs, pour assurer un intérêt économique de ces filières, cibler de gros volumes de flux entrant d’aimants sont primordiaux.

De plus, pour être représentatif, le concept devant satisfaire les futurs besoins du marché automobile (2025/2030), nous avons donc fait le choix de considérer la configuration suivante : un pilotage du moteur avec un onduleur de technologie SiC, sous une tension de bus DC de 750 V et avec une vitesse maximale de 18’000 tr/min pour une machine de forte compacité.



Fig. 1. Design final de la machine réalisé avec des barrières fluides.

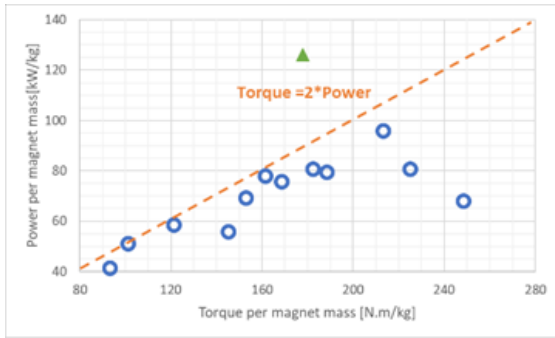


Fig. 3. Positionnement du design par rapport aux marché automobile actuel.

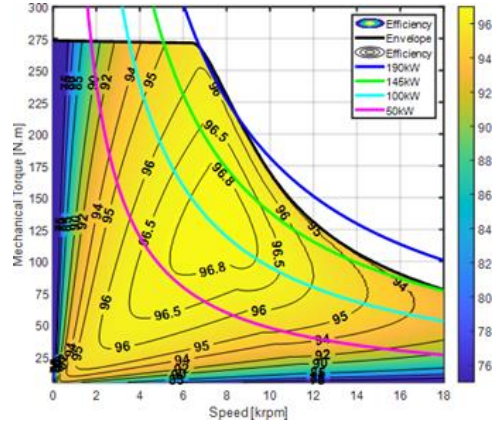


Fig. 2. Rendement de la machine électrique sous 750V<sub>DC</sub> et 400Ap.

Tableau 1. Cahier des charges de la machine électrique

Grandeurs caractéristiques	Objectifs / Contraintes
Couple pic [N.m]	>270
Puissance pic [kW]	>150 (sur toute la plage de vitesse)
Densité de courant [ $A_{rms}/mm^2$ ]	<25
Tension batterie [V <sub>DC</sub> ]	750
Courant Phase [Ap]	400
Volume [L]	<6
Vitesse maximal [tr/min]	18 000
Refroidissement	Eau ou Huile (à évaluer les deux solutions)

### 3. DIMENSIONNEMENT ET PERFORMANCES ELECTRIQUES

Pour réduire la consommation de terres rares entrant dans la composition de la machine électrique, nous avons fait le choix de concevoir une machine SynRelAP avec des barrières fluides pouvant contenir des aimants non prismatiques comme nous pouvons le voir sur la Fig. 1. Cela permet à la fois de maximiser le couple réductant lié à la forme de la tôle tout en bénéficiant du couple apporté par les aimants.

#### 3.1. Méthologie de dimensionnement du moteur

Le dimensionnement de la machine électrique est réalisé à partir du cahier des charges donné dans le paragraphe 2. Les principales contraintes et objectifs sont données dans le Tableau 1. Le critère à minimiser est alors la quantité d'aimant pour réduire la dépendance vis-à-vis des terres rares et augmenter la densité de puissance par kg d'aimant.

Nous noterons que deux systèmes de refroidissements seront comparés par la suite. Un premier avec une simple chemise à eau et un second uniquement à huile. Nous faisons le choix d'évaluer ces deux refroidissements car le premier correspond au standard actuel, simple et minimisant les efforts de traitement en fin de vie et le second correspond aux évolutions prévues pour le refroidissement des machines électriques dans le cadre d'application automobile [4]. De plus, l'évaluation des performances électromagnétiques est réalisée par calcul éléments finis à l'aide du logiciel FEMM [5].

Pour répondre au mieux au cahier des charges, il est nécessaire de réaliser une optimisation sous contrainte. Cependant, dans le cas d'un rotor SynRelAP, le nombre de variables d'optimisation peut devenir très important. Par

exemple, dans l'article de Cissé [5], il faut considérer plus d'une dizaine de variables par barrière de flux. Le nombre de machine à évaluer devient alors très important et le temps de calcul incompatible avec les durées de développements, chaque machine devant être évaluée par calculs éléments finis.

Ces difficultés peuvent être contournées en utilisant des surfaces de réponses générées à partir d'un nombre limité d'évaluations par éléments finis. L'optimisation de la machine électrique est alors réalisée à partir de ces surfaces. Cissé [5] met en avant la bonne prédiction de ces modèles pour évaluer et optimiser un design de machine électrique. Dans cet article, nous avons utilisé cette méthode pour optimiser le design à partir de la plateforme LAGUN [7] développée par IFPEN et Safran.

#### 3.2. Performances de la machine électrique

Le rotor final de la machine électrique est visible sur la Fig. 1. Nous avons convergé vers un modèle à 4 paires de pôles avec 3 barrières de flux. Les performances finales de la machine sont partagées dans le Tableau 2. Les contraintes les plus fortes lors de l'optimisation concernée la possibilité d'avoir une puissance suffisante à haute vitesse et sur le couple maximal.

Il est à noter que la densité de puissance et de couple pic obtenue est de 6.7kW/kg et de 9.5N.m/kg. Sur la Fig. 3, nous comparons ce résultat avec les principaux moteurs électriques pour la traction disponibles sur le marché européen actuellement pour la densité de puissance et de couple par kg d'aimant. Nous voyons que le positionnement de notre moteur en densité de puissance est en net décalage par rapport à l'existant. Ceci est permis par l'augmentation de la vitesse maximale du moteur et par la forme des barrières de flux.

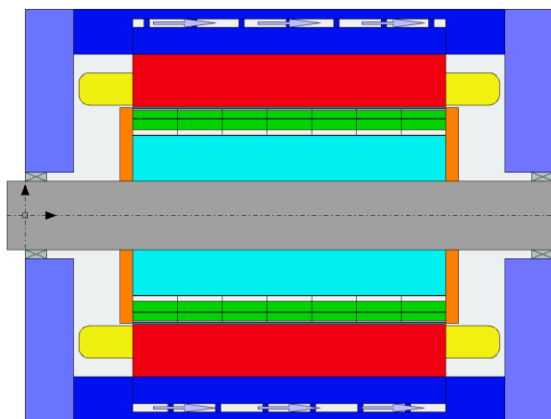


Fig. 4. Système de refroidissement à eau du moteur électrique.

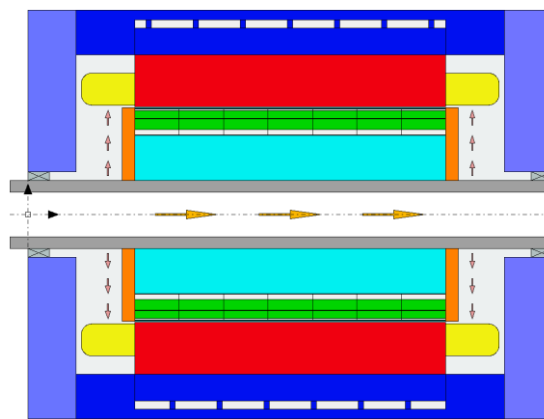


Fig. 5. Système de refroidissement à huile du moteur électrique.

Tableau 2. Caractéristiques de la machine électrique.

Grandeurs caractéristiques	Performances / dimensions attendues
Masse d'aimant [kg]	1.6
Masse des parties actives [kg]	28.1
Masse totale [kg]	58.5
Volume des parties actives [L]	5.4
Couple Maximal [N.m]	270
Puissance Maximale [kW]	190
Puissance à vitesse maximal [kW]	147
Rendement maximal [%]	97.0
Rendement sur cycle WLTP [%]	90.7

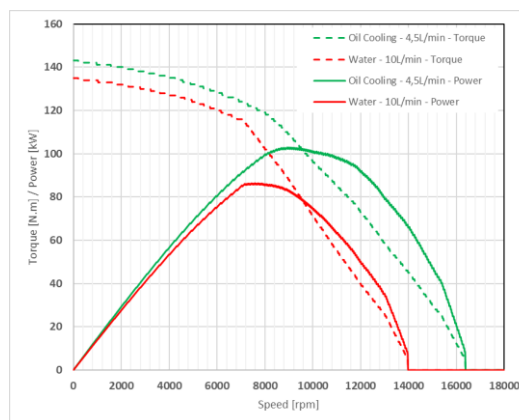


Fig. 6. Couple et puissance continue en fonction de la vitesse pour une température maximale de bobinage de 180°C et d'aimant de 150°C.

Sur la Fig. 2, nous traçons la cartographie de rendement total théorique de la machine électrique. Le rendement maximal est d'environ 97 % à 7000 tr/min et 100 kW. Sur cycle WLTC, le rendement moyen estimé est supérieur à 90%.

### 3.3. Méthode de refroidissement de la machine

Dans le paragraphe 3, nous avons fait le choix de considérer deux systèmes de refroidissement adaptés à notre étude. Dans un premier temps, nous avons évalué le niveau de performances avec un système de refroidissement conventionnel par chemise d'eau avec un débit de 10 L/min (Fig. 4). Dans un second temps, nous avons évalué un refroidissement à huile correspondant aux nouvelles architectures de machines électriques avec un débit d'huile de 4.5 L/min et une température en entrée de 40 °C. Ce refroidissement, visible sur la Fig. 5, est composé d'un refroidissement dans l'arbre et de jets impactants sur les têtes de bobines.

La comparaison des méthodes de refroidissement est réalisée sur les performances continues de la machine en considérant une température maximale de bobinage à 180 °C et une température maximale des aimants à 150 °C.

La Fig. 6 montre l'évolution du couple et de la puissance continue en fonction de la vitesse sous les contraintes données ci-dessus. On note que le refroidissement à huile permet de gagner 8 N.m sur le couple maximal (6 %) et 16kW sur la puissance maximale (19kW) permettant ainsi d'atteindre en fonctionnement continu un couple de 143N.m (5N.m/kg continus) et une puissance de 103kW (3.7kW/kg continus).

Ces gains sont obtenus par le refroidissement à l'huile car il impact directement les zones les plus chaudes du moteur qui sont classiquement le rotor et les têtes de bobines.

## 4. LES AIMANTS PIM

### 4.1. Le procédé PIM

Pour obtenir ces résultats en performances et également permettre une séparation des aimants du rotor en fin de vie facile, la conception des parties actives doit s'appuyer sur les aimants à formes complexe. Le procédé standard de fabrication des aimants est actuellement non adapté car il conduit à des pertes de matière importantes (30-50 %) pour obtenir, par usinage, les aimants non parallélépipédiques issus de l'optimisation, cf. Fig. 1.

Le moulage par injection de poudre (PIM), qui peut être considéré comme une évolution de la méthode classique de fabrication des aimants, ne présente pas cet inconvénient. Il consiste à remplir un moule avec un mélange de poudre et de polymères sous pression pour obtenir une forme complexe. Cette opération est suivie d'une étape de déliantage pour enlever le polymère fritter avant de réaliser la densification par frittage de l'aimant. Ce procédé permet alors de combiner les avantages de l'injection et du frittage pour obtenir des performances requises pour le domaine de la mobilité.

Ce procédé présente un fort intérêt pour économiser de la matière lors de la fabrication. Il est par ailleurs bien adapté pour de forts volumes de production (>100'000 pièces/an).

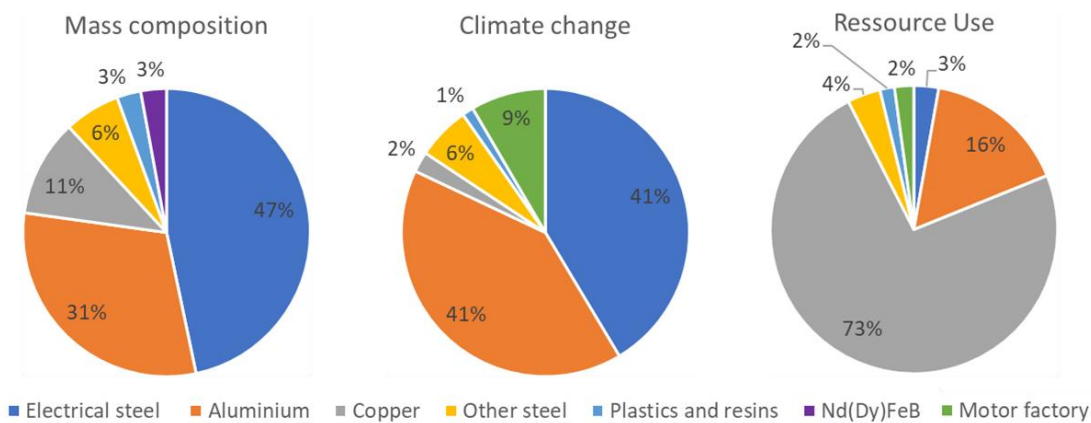


Fig. 7. Composition en masse de la machine électrique (à gauche), réchauffement climatique (au centre) et utilisation des ressources (à droite, noter que l'aimant n'est pas inclus ici).

#### 4.2. Niveau de performances

L'intérêt de la fabrication d'aimants NdFeB par le procédé PIM est reconnu depuis les travaux préliminaires de Yamashita et al. en 1995 [8]. Toutefois, le procédé n'est toujours pas déployé principalement du fait des difficultés pour maintenir des taux de contamination faibles en carbone. La pollution par le carbone provient de la dégradation des polymères pendant l'étape de déliantage qui conduit à des teneurs supérieures à la valeur critique de 1000 ppm [9]. Dans des travaux précédents, réalisés par certains des auteurs [10] un mélange poudre-polymère injectable a été formulé spécifiquement pour une poudre NdFeB de 5  $\mu\text{m}$  produite par strip-casting et jet-milling, avec des taux de charge de 60 % en volume. Après optimisation des conditions de déliantage, comprenant une étape à 620°C sous  $\text{H}_2$ , le taux de carbone a pu être limité à 1000 ppm ce qui permet d'obtenir des performances magnétiques comparables à celles atteintes avec la même poudre mise en forme par le procédé conventionnel (Fig. 7).

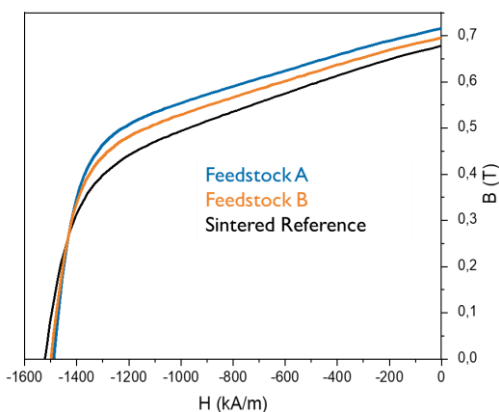


Fig. 7. Comparaison des performances magnétiques d'aimants frittés isotropes obtenus à partir d'une poudre NdFeB mise en forme par les procédé PIM (courbe orange et bleue) et conventionnel (courbe noire)

#### 5. ANALYSE DE CYCLE DE VIE (ACV)

L'objectif de l'analyse de cycle de vie est de quantifier l'impact environnemental de la machine et de montrer l'intérêt d'intégrer une approche d'éco-conception dans le développement d'un moteur industriel. Dans un premier temps, nous regarderons l'impact de la production d'un moteur conventionnel sans les aimants et dans un second temps, nous montrerons l'intérêt des aimants PIM dans le cadre d'une ACV.

La modélisation de l'ACV est réalisée avec la base de données Ecoinvent v3.8. La méthode de caractérisation utilisée

est la « Environmental Footprint EF 3.0 » recommandée par la Commission Européenne. Nous analysons l'impact sur le changement climatique et sur l'utilisation des ressources naturelles.

Nous concentrons notre analyse sur deux catégories d'impact : "changement climatique" (CC, kg  $\text{CO}_2$  eq) et "utilisation des ressources, minéraux et métaux" (RuMM, kg Sb eq).

##### 5.1. Analyse de cycle de vie du moteur électrique hors aimant

Dans cette partie, l'objectif est de déterminer les impacts de la fabrication d'un moteur SynRelAP d'une puissance maximale de 100 kW et d'un couple maximal de 260 Nm à titre de référence, en raison de la limite du modèle utilisé ci-dessous. Pour obtenir l'inventaire des données nécessaires à la modélisation, le travail réalisé par Nordelof est utilisé [11]. Le modèle d'ACV fournit des données sur la masse et la fabrication d'une machine à aimant permanent à la sortie de l'usine. L'unité fonctionnelle est un moteur électrique destiné à la traction automobile. Les données d'entrée proviennent de différentes étapes du traitement des matériaux, tel que disponibles dans la version 3 d'Ecoinvent [12]. D'un point de vue géographique, les processus représentent les conditions globales pour, entre autres, l'approvisionnement en électricité et la gestion des déchets.

Cet outil a été utilisé pour générer l'inventaire de cycle de vie d'un moteur de référence. L'avantage de ce modèle est qu'il permet d'obtenir des données de processus telles que la consommation d'énergie au cours des différentes étapes de la production du moteur.

L'outil génère le bilan de masse du moteur électrique. L'inventaire généré correspond à la production d'un moteur de 47,7 kg dont la composition massique est présentée dans la Fig. 7. Les principaux contributeurs de masse sont le fer magnétique (46,7 %) et l'aluminium (30,5 %). Ce bilan peut être comparé à un bilan de masse de notre conception de moteur ayant les mêmes caractéristiques de couple. Cette comparaison renforce la robustesse de l'outil Nordelof, même si l'obtention d'un bilan massique similaire ne signifie pas nécessairement que l'inventaire du cycle de vie est similaire (entre l'ACV Nordelof et l'ACV du moteur réel). L'inventaire du moteur généré est composé de plusieurs sous-ensembles : pièces de carter moulées sous pression, tôles de fer magnétique, autres aciers, cuivre, plastiques et résines, et usine de fabrication du moteur. La production de l'aimant n'est pas incluse ici et fera l'objet d'une attention particulière ultérieurement.



Tableau 3. Résultats de l'analyse de cycle de vie de la machine proposée.

Matériaux / Process	Changements Climatiques [Kg CO2 eq.]	Utilisation des ressources, des métaux et des minéraux [g Sb eq.]
Aluminium	121.3	1.26
Tôle électrique	123.7	0.22
Autres aciers	17.8	0.29
Cuivre	6.9	5.76
Plastiques et résines	3.8	0.13
Usine de fabrication	25.2	0.17
<b>Total</b>	<b>298.6</b>	<b>7.83</b>

Les résultats sont présentés dans le

Tableau 3 et dans la Fig. 7. Pour le changement climatique, le fer magnétique et l'aluminium sont les principaux facteurs d'impact, ils représentent chacun 40% à cause des procédés de fabrication. Dans le cas de l'utilisation des ressources, le cuivre est largement le plus important matériau impactant.

## 5.2. Analyse de cycle de vie des aimants

La fabrication d'aimants est évaluée dans un périmètre allant du berceau à la porte de l'usine pour la fourniture d'un aimant de 1 kg prêt à être utilisé dans un moteur. Ce périmètre comprend l'approvisionnement en matières premières, les étapes du procédé de fabrication et le traitement final anticorrosion par électrodéposition de nickel. Un tel périmètre permet de comparer les performances environnementales de la fourniture d'un aimant de forme spécifique, soit avec un procédé de fabrication conventionnel basé sur l'usinage, soit avec un procédé de fabrication proche de la forme finale tel que le procédé PIM. Une comparaison juste est obtenue à composition égale de l'aimant, étant donné que les deux procédés de fabrication conduisent aux mêmes performances de l'aimant. La composition de l'aimant est la suivante en pourcentage massique : 19 % Nd, 5 % Pr, 6 % Dy, 1 % B et 69 % Fe, comme décrit dans [13], ce qui conduit à un inventaire de cycle de vie agrégé pour la fabrication d'un aimant conventionnel. Cet inventaire tient compte d'une perte moyenne de matière de 43 % en poids due à l'usinage. Il a été adapté pour obtenir des valeurs d'impact pour différentes formes d'aimants : forme rectangulaire simple avec une perte par usinage de 25 % en poids et forme cylindrique complexe avec une perte de 65 %. La perte de matière pour un aimant fabriqué par PIM est estimée à seulement 20 % en poids, en raison des déchets liés à la mise œuvre du procédé ; elle est indépendante de la forme.

L'ACV de l'aimant fabriqué par PIM a été réalisée sur le procédé en plusieurs étapes, principalement à partir de données primaires pour les consommations de matériaux, de gaz, d'eau et d'énergie, pour la production de déchets et pour les émissions dans l'air. En l'absence de données primaires, des données bibliographiques ont été prises en compte, telles que l'électrodéposition du nickel, adaptée de Sprecher [14]. En ce qui concerne la consommation d'énergie, un mix électrique européen moyen a été pris en compte pour des potentiels sites de fabrication en Europe pour les deux procédés.

Les calculs d'impact donnent les valeurs suivantes pour la fabrication de 1 kg d'aimant du berceau à la porte de l'usine par le procédé PIM : 47,5 kg CO<sub>2</sub> eq/kg d'aimant pour CC et 1,3 g Sb eq/kg d'aimant pour RuMM. Pour les deux catégories d'impact, le principal facteur contribuant à ces valeurs est la fourniture de la poudre métallique de l'aimant (respectivement 44 % et 77 %). Ce résultat montre que la collecte des aimants en

fin de vie en vue de leur récupération et de la substitution des matières premières par des matières secondaires, comme dans le cas des aimants PIM, joue un rôle important dans la réduction de l'empreinte carbone et de l'utilisation des ressources dans la fabrication des aimants, à condition que les impacts environnementaux du traitement en fin de vie soient limités et maîtrisés.

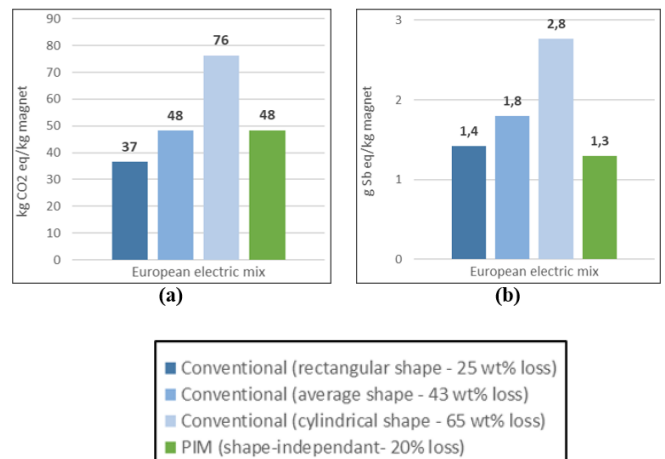


Fig. 8 Résultats comparatifs des procédés de fabrication conventionnelle et PIM pour le "changement climatique" (a) et l'"utilisation des ressources, minéraux et métaux" (b). Analyse de cycle de vie des aimants

La comparaison des performances environnementales des procédés de fabrication conventionnelle et PIM est présentée à la Fig. 8. En ce qui concerne l'empreinte carbone, le procédé de fabrication PIM présente les mêmes performances que le procédé d'usinage conventionnel avec une perte moyenne de matière pendant la fabrication. Ce résultat s'explique par le fait que, bien que le procédé PIM induise moins de pertes de matière, sa consommation d'énergie est plus élevée en raison du plus grand nombre d'étapes de fabrication. Un site de fabrication situé dans un pays où la teneur en carbone du mix électrique est plus faible améliorerait les performances de fabrication du procédé PIM. Comme la perte de matériaux du procédé PIM est indépendante de la forme de l'aimant, lorsque des aimants de forme plus simple doivent être fabriqués, le procédé de fabrication conventionnelle pourrait être préféré (21 % d'impact en moins pour une pièce rectangulaire), tandis que, lorsque la forme devient plus complexe, le procédé PIM est plus avantageux que le procédé conventionnel avec une empreinte carbone réduite à 63 % de celle du procédé conventionnel. En termes de consommation de ressources, la même tendance est observée : plus la forme de l'aimant à fabriquer est complexe, plus le procédé PIM est avantageux par rapport au procédé conventionnel.

## 5.3. Synthèse de l'analyse de cycle de vie

Le Tableau 4 résume les résultats de la production de moteurs électriques explicité dans le paragraphe 5.1 en ce qui concerne le changement climatique et l'utilisation des ressources. Pour l'aimant, deux options sont présentées : l'aimant complexe conventionnel et l'aimant PIM. L'impact de l'aimant conventionnel pour l'indicateur de réchauffement climatique représente un quart de l'impact global de la production du moteur. L'utilisation de l'aimant PIM dans le cas de formes complexes réduit à la fois l'impact du réchauffement climatique et l'impact sur l'épuisement des ressources abiotiques.

Dans les prochaines étapes, il serait pertinent d'étudier la phase de fin de vie du moteur électrique en examinant tout

d'abord la littérature pour recueillir les taux de recyclabilité des différents matériaux (aimants, aluminium et fer magnétique en particulier) dans les procédés de recyclage conventionnels. Dans un second temps, il convient de déterminer si l'utilisation de l'aimant PIM dans la machine électrique conçue permet d'améliorer les taux de recyclabilité de ces matériaux mais aussi d'obtenir des matériaux en meilleur état. En effet, l'augmentation du taux de recyclabilité pourrait réduire considérablement les impacts du cycle de vie du moteur.

Tableau 4. Impacts environnementaux de la fabrication d'une machine électrique.

Catégorie	Changements Climatiques [Kg CO2 eq.]	Utilisation des ressources, des métaux et des minéraux [g Sb eq.]
Aimant conventionnel complexe	103.4	3.76
PIM (complexe ou simple)	65.3	1.76
Machine électrique (hors aimant)	298.6	7.83

## 6. CONCLUSIONS

Dans cet article, nous avons essayé une analyse complète d'une machine électrique pour la traction automobile dans une chaîne de valeur orientée recyclage.

Pour cela, nous avons considéré dans un premier temps un cahier des charges représentatif du marché automobile à 2030 avec des moteurs haute vitesse et haute tension piloté par des onduleurs SiC. Nous avons ensuite optimisé la forme de la tôle pour obtenir les performances magnétiques que nous nous étions fixés. Cela nous a permis de proposer un design de 270N.m et 150kW avec moins de 1.6kg d'aimant. Par la suite les performances thermiques du moteur ont été évaluées pour voir l'intérêt des futurs systèmes de refroidissement des moteurs électriques pour l'automobile.

Finalement, une analyse de cycle de vie de la fabrication du moteur a été réalisée avec des aimants conventionnels et PIM. Nous avons alors vu, le fort impact du cuivre sur l'utilisation des ressources naturelles mais aussi des tôles magnétiques et de l'aluminium sur le changement climatique. Pour conclure, nous avons mis en évidence l'intérêt des aimants PIM dans le cas de formes d'aimants complexes pour réduire l'impact environnemental de la machine électrique pendant sa phase de fabrication.

Par la suite, il sera intéressant de valider ces résultats par des essais sur banc de test électrique. Nous pourrions aussi compléter

l'analyse de cycle de vie en prenant en compte la fin de vie des matériaux et regardant l'impact du recyclage sur celle-ci.

## 7. REFERENCES

- [1] Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., Mathieux, F., & Pavel, C. (2020). Critical raw materials for strategic technologies and sectors in the EU—a foresight study. European Commission, 100.
- [2] Megevand, B., Cao, W. J., Di Maio, F., & Rem, P. (2022). Circularity in Practice: Re-view of Main Current Approaches and Strategic Propositions for an Efficient Circular Economy of Materials. *Sustainability*, 14(2), 962.
- [3] <https://www.susmagpro.eu/>
- [4] Gundabattini, E., Mystkowski, A., Idzkowski, A., & Solomon, D. G. (2021). Thermal mapping of a high-speed electric motor used for traction applications and analysis of various cooling methods—A review. *Energies*, 14(5), 1472.
- [5] Meeker, D., Bianchi, N., Gyselinck, J., Sabariego, R., Alberti, L., Pellegrino, G., & Cupertino, F. (2017). Electrical machine analysis using free software. In 2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). IEEE
- [6] Cissé, K. M., Nasr, A., Chareyron, B., Abdelli, A., & Milosavljevic, M. (2022, Septem-ber). Surrogate Model-Based Optimization Methodology for High Torque and Power Density Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor. In 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM) (pp. 295-301). IEEE.
- [7] <https://www.linkedin.com/pulse/lagun-open-source-platform-data-exploration-s%C3%A9bastien-da-veiga/>
- [8] O. Yamashita, "Magnetic properties of Nd-Fe-B magnets prepared by metal injection molding," *International Journal of Powder Metallurgy* (Princeton, New Jersey), vol. 34, no. 7, pp. 41–50, 1998.
- [9] L. U. Lopes, E. Costa Santos, T. Hartwig, and P. A. Wendhausen, "Investigation of the influence of carbon on the magnetic properties of powder injection molded Nd-Fe-B magnet," in *International Conference on Magnetism (INTERMAG)*, 2015, pp. 1–1
- [10] T. Bioud, O. Maelig, L. Favergeon, S. Luca and S. Rolere, "Net-Shaped NdFeB magnets made by Powder Injection Molding: Lowering the organic contamination." in *Proceedings of the World PM2022 Congress Proceedings*, Lyon, France, 9–13 October 2022
- [11] Nordelöf, A., Grunditz, E., Tillman, AM. et al. A scalable life cycle inventory of an electrical automotive traction machine—Part I: design and composition. *Int J Life Cycle Assess* 23, 55–69 (2018).<https://doi.org/10.1007/s11367-017-1308-9>
- [12] Weidema, B. P., Bauer, C., Hischer, R., Mutel, C., Nemecek, T., Reinhard, J., ... & Wernet, G. (2013). Overview and methodology: Data quality guideline for the ecoinvent database version 3.
- [13] Jin, H., Afüny, P., Dove, S., Furlan, G., Zakotnik, M., Yih, Y., & Sutherland, J. W. (2018). Life cycle assessment of neodymium-iron-boron magnet-to-magnet recycling for electric vehicle motors. *Environmental science & technology*, 52(6), 3796-3802.
- [14] Sprecher, B., Xiao, Y., Walton, A., Speight, J., Harris, R., Kleijn, R., ... & Kramer, G. J. (2014). Life cycle inventory of the production of rare earths and the subsequent production of NdFeB rare earth permanent magnets. *Environmental science & technology*, 48(7), 3951-3958.