

Nouvelle gamme de moteurs électriques sans terres rares de 48V pour la mobilité légère et industrielle

Koua Malick CISSE¹, Misa MILOSAVLJEVIC¹, Vincent MALLARD²

¹IFP Énergies nouvelles, Rueil-Malmaison, France, ²Mov’Ntec, Ruitz, France

RÉSUMÉ - Cet article présente le développement d’une nouvelle génération de moteurs électriques destinés aux applications de mobilité légère et industrielle, réalisée en collaboration entre IFP Énergies nouvelles et Mov’Ntec. La gamme repose sur une technologie de machines synchro-réductantes assistée d’aimants permanents sans terres rares, fonctionnant sous une tension nominale de 48 V et refroidies par convection naturelle. Trois niveaux de puissances continues ont été développés : 2, 4 et 6 kW. Ces machines se démarquent de l’état de l’art par leur compétitivité en coût de fabrication, tout en atteignant des rendements maximaux supérieurs à 94 %, une performance remarquable pour cette classe de puissance.

Mots-clés—Moteur électrique synchro-réductant, aimants ferrites, sans terres rares, moteurs 48V, mobilité durable, recyclabilité, performances continues.

1. INTRODUCTION

L’électrification des systèmes de transport et des applications industrielles est un enjeu majeur pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. L’essor de l’électrification des vélos et des scooters a posé les bases technologiques, structurelles et organisationnelles favorisant l’acceptation sociétale de la transition vers des modes de transport électriques. La seconde vague de cette révolution de la mobilité concerne les véhicules légers alternatifs (catégories L2 à L6) [1, 2], dont le développement devrait connaître une forte croissance dans les prochaines années. Cette croissance sera portée par l’émergence de solutions innovantes, tant en matière de fonctionnalités que de conception, et s’accompagnera d’une augmentation rapide des volumes de production.

Cependant, le passage des motorisations thermiques vers des chaînes de traction électriques dans le domaine de la mobilité légère soulève encore des défis majeurs, centrés principalement sur les matériaux utilisés, leur disponibilité, leur coût et, in fine, leur impact global à travers l’efficacité énergétique qu’ils permettent d’atteindre.

Dans ce contexte, nous proposons de dimensionner un moteur électrique à hautes performances approvisionné localement et assemblé en France sans terres rares et conçu pour réduire les pertes en fabrication, facilitant la prolongation de vie par réparation et le recyclage en fin de vie pour la mobilité légère et des applications industrielles.

Nous présenterons dans un premier temps un état de l’art des technologies de moteurs utilisés dans la mobilité légère et les exigences fonctionnelles de la gamme de moteurs à développer. Ensuite, nous exposerons la méthodologie de dimensionnement de la gamme de machines synchro-réductantes assistée par aimants ferrites (2, 4 et 6kW) en exposant les contraintes et les

choix technologiques retenus, nous validerons les performances continues des machines via des simulations sous MotorCad.

2. ÉTATS DE L’ART ET SPECIFICATIONS POUR LA GAMME DE MOTEURS.

2.1. État de l’art

Les chaînes de propulsion des véhicules de classe L2 à L6 reposent majoritairement sur des motorisations de type BLDC (moteur à courant continu sans balais) ou SPM (moteur synchrone à aimant en surface), principalement importées d’Asie.

Un des fabricants asiatiques (Asie n°1) propose une large gamme de moteurs BLDC et PMSM (moteurs synchrones à aimants permanents) adaptés à diverses applications telles que les vélos électriques, scooters, motos, voitures, bateaux et autres véhicules électriques. Leur catalogue comprend des moteurs allant de 200 W à 30 kW, avec des options de refroidissement par air ou liquide, ainsi que des onduleurs compatibles. [3]. La référence de moteur concurrent à notre application est la « HPM3000B-HighPower BLDC/PMSM Motor ». C’est un moteur de 48V ayant une un couple continu et puissance continue respectivement de 3kW et 10N.m. Les caractéristiques principales de cette machine sont résumées dans le Tableau 1.

En Europe, ces véhicules utilisent soit des moteurs issus de la gamme industrielle, soit des machines dérivées de la production automobile de grande série, tels que les moteurs à griffes de type BSG (alternodémarreur à courroie) développés par VALEO. Un des constructeurs européen (Europe n°1) propose des moteurs IPM (moteur synchrone à aimants enterrés) adaptés à la mobilité légère. [4]. Le moteur de référence « SMAC 132-050 » présente des caractéristiques pertinentes pour notre application. Il dispose d’un couple continu et puissance continue de 8.7N.m et de 3.5kW. Ses performances le positionnent comme une alternative crédible aux moteurs BLDC couramment utilisés et importés d’Asie.

Des constructeurs américains (USA n°1) [5] et (USA n°2) [6] propose également des solutions pour la mobilité légère et pour certaines applications industrielles. Leur gamme respective « IPM 120-60 AR03 » et « GVM142-075 » offrent des puissances continues supérieures à 5kW (voir Tableau 1).

Les moteurs électriques présentés utilisent tous des aimants permanents de type néodyme-fer-bore en raison de leur forte densité de puissance.

Tableau 1: État de l’art des moteurs électriques utilisés pour la mobilité légère

	Asie n°1	Europe n°1	USA n°1	USA n°2
Tension DC [V]	48/72	48	24 - 96	48
Couple continu [N.m]	10	8.7		16 - 23

Puissance continue [kW]	2 - 3	2 – 3.5	1.5 – 5.5	3 - 7
Vitesse max [tr/min]	5000	7000	5400	7500
Rendement [%]	>90	>91	>90	
Longueur [mm]	125			
Diamètre [mm]	180			
Masse [kg]	7.3		8	
Refroidissement	Air/Liquide	Air		Liquide

2.2. Spécifications de la gamme de moteurs

L'état de l'art des chaînes de traction électriques pour la mobilité légère repose principalement sur des solutions à aimants permanents intégrant des terres rares. Cette dépendance soulève des enjeux majeurs en termes de diversification de l'approvisionnement, de volatilité des coûts et d'impact environnemental. Face à ces limites technologiques, économiques et environnementales, il devient nécessaire d'explorer de nouvelles approches plus durables et souveraines pour accompagner l'essor de la mobilité légère.

Les objectifs visés pour le développement de la gamme de moteurs sont de : utiliser des matériaux non critiques et privilégier une chaîne d'approvisionnement européenne, limiter l'impact environnement dès la phase de production en adoptant une fabrication zéro déchet, avoir un rendement supérieur à 94% sur une large plage de fonctionnement, permettre l'intégration aisée dans différents types de véhicules, sans nécessiter d'adaptations complexes, proposer une gamme compétitive économiquement alignée sur les standards actuels du marché, assurant son acceptabilité industrielle et commerciale, permettre la rénovation en service et un démantèlement simplifié en fin de vie, en cohérence avec une logique d'économie circulaire.

Les caractéristiques techniques de la chaîne de conversion à développer sont résumées dans Tableau 2.

Tableau 2: Exigences techniques de la gamme de moteurs

Paramètres	Valeur
Tension DC [V]	48
Couple continu [N.m]	12 – 16 – 20
Puissance continue [V]	2 – 4 – 6
Vitesse max [tr/min]	8000
Cooling	Air (convection naturelle)
Onduleur	3-phases (standard du marché)

3. METHODOLOGIE D'OPTIMISATION DES PARTIES ACTIVES

3.1. Choix de la technologie du moteur

Nous avons opté pour une topologie de machine synchro-reluctante à aimants ferrites sans terres rares lourdes pour compenser la faible rémanence des aimants ferrites et répondre aux exigences du cahier des charges. Le stator est doté d'un bobinage concentrique sur dent, pour réduire la longueur des têtes de bobines et faciliter la segmentation des dents afin de limiter les rebuts de tôle. Le diamètre extérieur du stator est de 114 mm, ce qui limite le nombre de barrières de flux au rotor. La sensibilité des aimants ferrites aux dimensions faibles a été intégrée dans l'optimisation afin d'assurer leur faisabilité à coût acceptable. Pour ces raisons, nous avons opté pour deux barrières de flux au rotor : une en U, contenant les aimants ferrites, et une en V, sans aimants, dont le rôle principal est de réduire les ondulations de couple.

3.2. Méthodologie d'optimisation du rotor et du stator

Pour le dimensionnement de la machine, nous avons utilisé une méthodologie d'optimisation multiphysique basée sur des modèles de calculs par éléments finis 2D et de métamodèles [3, 4]. La méthodologie d'optimisation peut être décrite en quatre étapes :

Étape 1 : La morphologie et les paramètres de la machine sont configurés à l'aide de k variables d'optimisation. Un ensemble de N configurations est ensuite généré par la méthode d'échantillonnage Latin Hypercube (LHS), afin de couvrir efficacement l'espace des variables.

Étape 2 : Les performances électromagnétiques et contraintes mécaniques à la vitesse maximale des N machines générées sont évaluées par des calculs éléments finis (FE). Ces calculs sont parallélisés et exécutés sur un cluster de calcul haute performance afin de réduire significativement le temps de simulation global.

Étape 3 : Pour chacune des grandeurs de sortie, un modèle de substitution (métamodèle) est construit à l'aide de la méthode d'interpolation par Krigeage.

Étape 4 : Plusieurs optimisations mono-objectifs et multi-objectifs sont réalisées à partir des métamodèles afin d'identifier les configurations optimales de la machine.

Nous disposons pour cette machine à optimiser de 17 variables permettant de modéliser les barrières de flux au rotor, les encoches statoriques et le courant d'alimentation. Les Figure 1 et Figure 2 décrivent respectivement le paramétrage géométrique du rotor et du stator. La machine étant refroidie à air par convection naturelle, nous avons limité la densité de courant à 10 Arms/mm² [8] durant le processus d'optimisation.

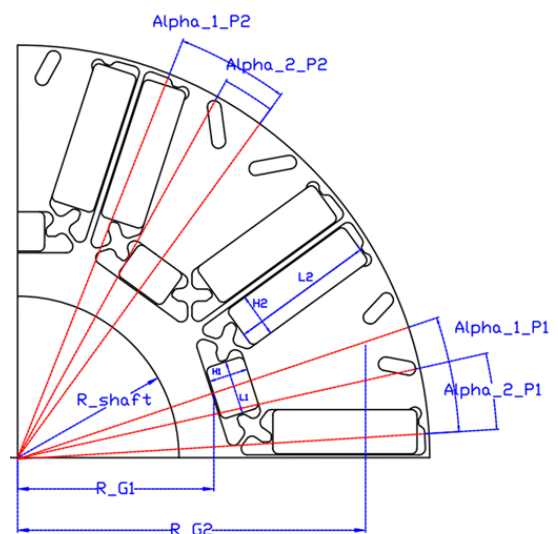


Figure 1: Paramètres géométriques du rotor

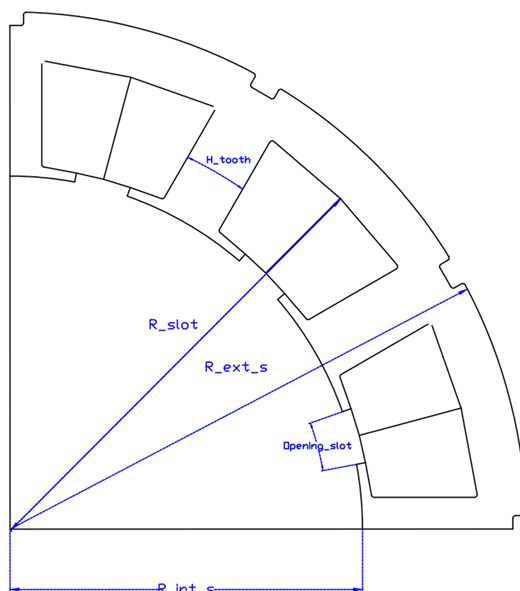


Figure 2: Paramètres géométriques du stator

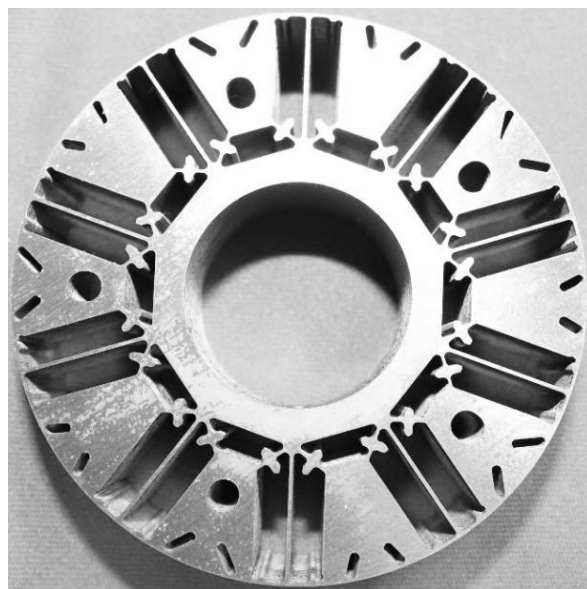


Figure 3: Stack rotor du dessin optimal

4. RESULTATS D'OPTIMISATION

4.1. Géométrie optimale

Le dessin de la gamme de machines a été optimisé sur le cahier de charge de la machine 6kW (puissance continue) qui est la plus contraignante. Pour obtenir les machines de la gamme (4kW et 2kW), nous avons modifié le nombre de spires et la longueur active de manière à intégrer l'onduleur issu du marché avec le calibre de courant et le coût en lien avec la gamme de puissance. Le Tableau 3 donne les caractéristiques de la gamme de moteurs. Par la suite, nous présenterons uniquement les performances de la machine 6kW.

Tableau 3: Caractéristiques de la gamme de moteurs 2kW, 4kW et 6kW

Puissance [kW]	Couple [N.m]	Nombre de spires [-]	Courant nominal [Arms]	Longueur active [mm]
6	20	2	240	180
4	16	3	155	138
2	12	4	120	91

Pour l'optimisation de la machine 6kW, nous avons évalué plusieurs configurations de nombre de dents et de pôles. Les contraintes géométriques de la machine (faible diamètre extérieur) nous ont limités le nombre d'encoches et de pôles à considérer. Seules configurations avec un coefficient de bobinage supérieur à 90% ont été sélectionnées (voir Tableau 4). L'architecture 14-pôles a été éliminée car elle conduisait à des aimants de faibles épaisseurs en dessous des 3mm, économiquement pas viables et mécaniquement fragiles. La configuration 9-encoches quant à elle augmentait le courant onduleur de 30% par rapport à la solution optimale. Nous avons convergé vers une topologie de machine synchro-reluctante à 12 encoches et 10 pôles les plus adaptés au cahier des charges. La géométrie du rotor de la machine optimale est donnée à la Figure 3.

Tableau 4: Coefficient de remplissage en du nombre d'encoches et de pôles

Nombre de paires de pôles	9 - 8	9 - 10	12 - 10	12 - 14
Facteur de bobinage [-]	0.945	0.945	0.966	0.966

4.2. Performances Electromagnétique du dessin 6kW

Les caractéristiques principales de la machine 6kW sont données dans le Tableau 5. Cette machine comporte 2 spires. Chacune des spires constituées de 48 fils en parallèles de 0.8mm de diamètre afin de réduire la densité de courant dans l'encoche.

Tableau 5: Caractéristiques principales de la machine 6kW

Characteristics	Value
Diamètre extérieur stator, ODs (mm)	114
Diamètre intérieur stator, IDs (mm)	77.83
Diamètre extérieur rotor, ODr (mm)	76.63
Diamètre intérieur rotor, IDr (mm)	30
Longueur active (stack stator) (mm)	180
Grade Fer rotor/stator [-]	M250-35A
Entrefer (mm)	0.6
Nombre de paires de pôles p (-)	5
Nombre d'encoches Qs (-)	12
Number of phases, m (-)	3
Connexion des phases (-)	Star
Résistance de phase à 25°C (mOhm)	2.7
Grade aimant	Ferrite
Br à 25°C (T)	0.425
HCj à 25°C (kA/m)	428

La tension à vide de la machine 6kW est donnée à la Figure 4 et contient peu d'harmoniques. Nous avons contraint la machine pour obtenir les tensions induites les plus sinusoïdales possibles. À 25°C, le pic de la tension à 8000 tr/min est de 65V contre 63V pour le fondamental, ce qui nous semble satisfaisant pour la suite.

Nous avons également tracé l'évolution du couple nominal et des ondulations de couple en fonction du courant (voir Figure 5). Pour ces niveaux de courant, la machine reste dans sa zone de fonctionnement linéaire. Les ondulations de couple restent en dessous de 15% pour des couples supérieurs à 5 N.m et valent 5% pour à fort couple, soit au niveau des exigences automobile. Cette caractéristique est un avantage pour cette machine en vue de son intégration dans les applications insonorisées.

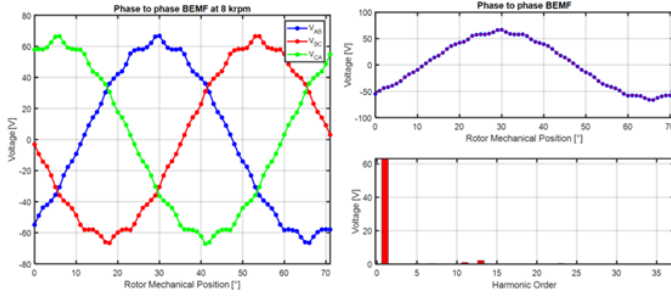


Figure 4: Tension à vide de la machine 6kW

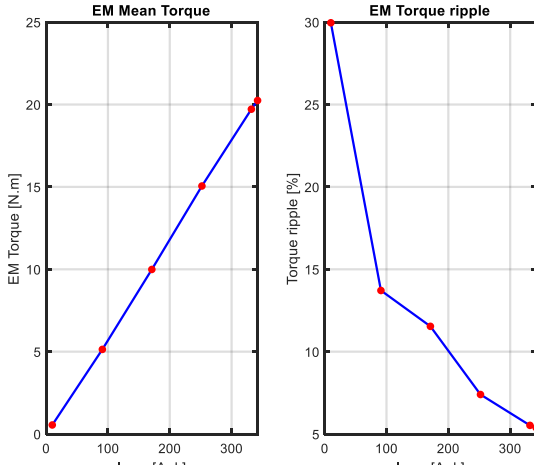


Figure 5: Couple nominal et ondulations de couple en fonction du courant

La Figure 6 présente la cartographie de la machine 6kW en fonctionnement moteur et générateur. Le rendement effectif maximal de la machine est supérieur à 95% (placé dans la zone de fonctionnement la plus récurrente sur les applications visées) avec une large zone de rendement supérieur à 90%. La puissance maximale est supérieure aux 6kW demandés par le cahier des charges et présente un rendement de 92 à 94% minimisant les pertes énergétiques aux points les plus contraignants pour la batterie et le système de refroidissement.

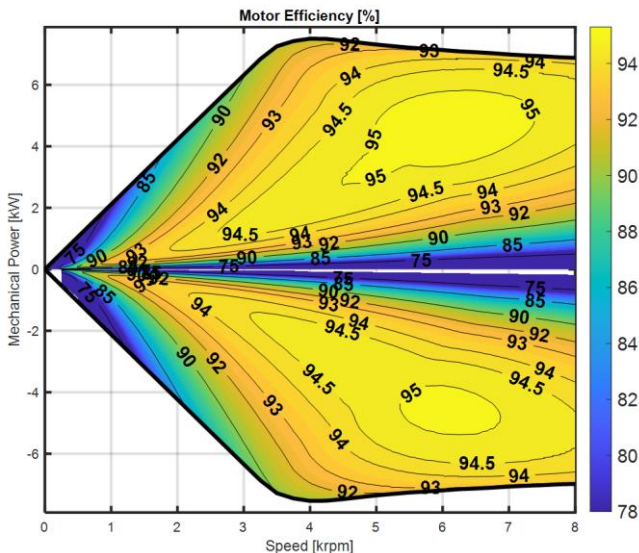


Figure 6: Cartographie du moteur 6kW

En ce qui concerne l'autonomie du véhicule, dans le segment des quadricycles légers à puissance limitée, la zone de fonctionnement stratégique semble se situer entre 50 % et 75 % de la vitesse maximale, et proche de la puissance continue maximale (entre 50 % et 80 %). C'est pourquoi les algorithmes d'optimisation du moteur ont convergé la conception vers une maximisation du rendement dans cette zone de fonctionnement.

4.3. Assemblage du moteur

La Figure 7 illustre une vue éclatée des composants actifs et passifs de la machine électrique. Le cahier des charges a été partiellement défini par des contraintes industrielles imposées par notre partenaire, privilégiant l'optimisation des coûts des parties actives tout en utilisant des parties passives standardisées, telles qu'un carter standard en profilé en aluminium extrudé, des flasques en fonderie sous pression et un diamètre arbre convenant aux couplages IEC etc. Le plus d'efforts ont été consentis sur l'accès facilité pour le service de la machine en cours de vie et la répétabilité en minimisant le volume de pièces à remplacer en cas de panne.

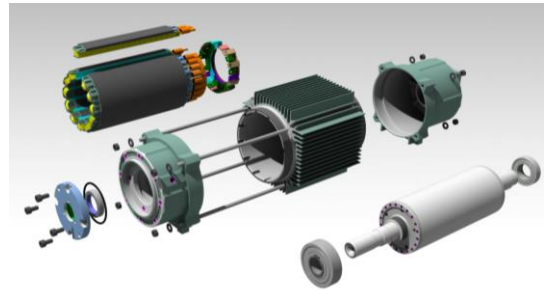


Figure 7: Assemblage du moteur 6kW

5. VALIDATION THERMIQUE DU CONCEPT SOUS MOTORCAD

Nous avons modélisé et simulé le design optimal de la machine de 6 kW afin de valider son fonctionnement en régime continu. Les résistances d'interface, ainsi que d'autres paramètres, ont été calibrées à l'aide de mesures expérimentales et de simulations effectuées sur MotorCad et Ansys

5.1. Conditions de simulation

Préalablement aux calculs sur MotorCad, nous avons déterminé les cartographies du moteur pour 3 températures d'aimants, 25°C, 80°C et 150°C. Ces données ont ensuite été interpolées en fonction de la température des aimants. Les calculs électromagnétiques ont été effectués pour une seule température du cuivre à 100°C, car MotorCad prend en compte la dépendance des pertes cuivre en fonction de la température. Sur MotorCad, nous avons testé l'imprégnation (vernis) dans les encoches statoriques et le potting (résine améliorant la conductivité thermique). Le coefficient d'échange thermique « h_{conv} » entre l'air ambiant et le carter est évalué directement par MotorCad en fonction de la géométrie des ailettes du carter et de la vitesse de l'air. Il varie entre 3W/m²/°C et 10W/m²/°C en convection naturelle et supérieure à 20W/m²/°C en convection forcée.

5.2. Résultats de simulation

Les simulations réalisées sur plusieurs points de fonctionnement ont révélé que, pour cette application,

l'utilisation du potting avait un impact négligeable sur la température des têtes de bobines, des aimants et des roulements, car le point limitant reste l'échange entre le carter et l'ambient. En revanche, la convection forcée s'est avérée significativement plus efficace pour le refroidissement de la machine.

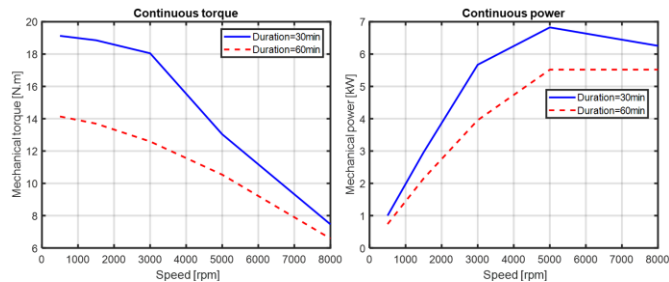


Figure 8: Couple et puissance continue du moteur 6kW

Pour tracer le couple continu et la puissance continue en fonction de la vitesse, nous avons pour chaque vitesse déterminé le couple qui permettait de respecter la limite de température des bobines, des aimants et des roulements pendant une durée donnée. Ainsi, nous avons sur la Figure 8, les performances continues pour 30min et 60min. Le couple continu à basse vitesse est de 19N·m pour une durée de 30min. Ce couple correspond à une densité de courant de 9.5Arms/mm². Ce résultat valide l'hypothèse de considérer une densité de courant de 10Arms/mm² dans le processus d'optimisation. Le Tableau 6 donne les températures limites pour le calcul des points en continu.

Tableau 6: Températures limites pour le calcul des points continus

	Bobines	Aimants	Roulements
Températures limites [°C]	180	140	140

5.3. Démagnétisation

Nous avons évalué la démagnétisation des aimants ferrites sous plusieurs conditions de fonctionnement. Pour la méthodologie adoptée, nous avons calculé dans un premier temps, le champ magnétique dans chaque élément de maillage pour un point de fonctionnement donné. Par la suite ce champ a été comparé au seuil critique de démagnétisation défini comme le champ magnétique H correspondant à 90 % de l'induction rémanente. Enfin, le pourcentage du volume de l'aimant dépassant ce seuil de démagnétisation est calculé.

Les calculs effectués sur l'enveloppe de couple et de puissance, pour des aimants à -15 °C, ont montré l'absence de démagnétisation. Pour le courant de court-circuit transitoire, le risque de démagnétisation a été estimé à 0,5 %, avec un impact sur le couple inférieur à 0,1 %, ce qui reste acceptable.

6. CONCLUSIONS

Nous avons présenté le développement d'une gamme de moteurs électriques de 2kW, 4kW et 6kW pour la mobilité légère. La topologie retenue pour cette gamme est une machine synchro-reluctante assistée d'aimants ferrites, sans terres rares stratégiques, permettant de maximiser la réluctance pour tirer parti des aimants ferrites.

Nous avons d'abord optimisé la machine de 6 kW, qui a servi de base pour décliner ensuite les moteurs de 2 kW et 4 kW. Le moteur 6kW offre un rendement supérieur à 95 % et garantit une puissance continue de 6 kW pendant 30 minutes, conformément aux exigences d'homologation.

Côté intégration véhicule, la gamme a été conçue pour une mise en œuvre simple, avec peu d'adaptations nécessaires grâce à des interfaces facilement interchangeables et une compatibilité avec les onduleurs standards du marché. Les performances continues sont atteintes en convection naturelle, sans flux d'air forcé, permettant un refroidissement passif.

7. REMERCIEMENTS

Ce travail s'inscrit dans le cadre du plan France Relance, avec un financement de l'Union européenne via le programme Next Generation EU.

8. REFERENCES

- [1] Department for Transport, "Annex B: L-category Vehicle Classification,"
- [2] Low Carbon Vehicle Partnership, "Powered Light Vehicles: Opportunities for Low Carbon 'L-Category' Vehicles in the UK,"
- [3] Golden Motor, *Golden Motor – Brushless Motors and Controllers*. [Online]. Available: <https://www.goldenmotor.com/>
- [4] Benevelli Electric Powertrain Solutions, *Electric IPM Motors – SMAC Series*. [Online]. Available: <https://www.e-comer.com/en/products-for-electric-vehicles-en/electric-motors-en/electric-motor-ipm-smac-serie-en.html>
- [5] Dana TM4, *IPM120 Series – Internal Permanent Magnet Motors*. [Online]. Available: <https://www.scribd.com/document/552887424/IPM120-series-brochure-web>
- [6] Parker Hannifin Corporation, *GVM142 Series – Global Vehicle Motors for Electric Mobility*. [Online]. Available: <https://ph.parker.com/us/en/global-vehicle-motor-gvm-series>
- [7] K. M. Cisse, A. Nasr, B. Chareyron, A. Abdelli, and M. Milosavljevic, "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)*, Valencia, Spain, 2022, pp. 295–301.
- [8] Alireza Fatemi, Dan M. Ionel, Nabeel Demerdash, and Thomas W. Nehl, "Optimal Design of IPM Motors With Different Cooling Systems and Winding Configurations,"