



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Département fédéral de l'environnement, des
transports, de l'énergie et de la communication DETEC

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section recherche énergétique et cleantech

Rapport final du 29 novembre 2024

FREA

Motorisation compacte à haute efficacité pour des véhicules légers



Source: Shematic SA 2024



Prestataire de subvention :

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section recherche énergétique et cleantech
CH-3003 Berne
www.recherche-energetique.ch

Cofinancement : -

Bénéficiaires de la subvention :

Shematic SA
Chemin Lucien Chevallaz, 5, 1170 Aubonne
www.shematic.ch

heig-vd

Route de Cheseaux, 1 1401 Yverdon-les-Bains
<https://heig-vd.ch/recherche/instituts/ie/>

BFH Energy Storage Research Centre

Quellgasse, 21, 2501 Biel
<https://www.bfh.ch/en/research/research-areas/energy-storage-center/>

Auteur(s) :

Cédric Flüeli, Shematic SA, cedric.flueli@shematic.ch

Christophe Besson, heig-vd, christophe.besson@heig-vd.ch
Alain Savary, heig-vd, alain.savary@heig-vd.ch

Priscilla Caliandro, BFH, priscilla.caliandro@bfh.ch

Bruno Lemoine, BFH, bruno.lemoine@bfh.ch

Bastien Binz, BFH, bastien.binz@bfh.ch

Suivi du projet à l'OFEN :

Luca Castiglioni, luca.castiglioni@bfe.admin.ch

Numéro du contrat de l'OFEN : SI/502278-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.



Résumé

Les Véhicules Utilitaires Légers électriques (VULe) gagnent en popularité dans le contexte des exigences croissantes de durabilité, de réduction des émissions et des besoins de logistique urbaine. Ces véhicules, utilisés principalement pour les livraisons du dernier kilomètre ou les services urbains, représentent une solution intermédiaire entre les vélos électriques et les véhicules utilitaires classiques. Cependant, leur adoption est encore freinée par plusieurs limites techniques et économiques.

Le projet FREA, initié par Shematic SA, se concentre sur le développement d'une nouvelle génération de motorisation compacte et performante pour les VULe. Ce projet répond aux besoins croissants d'une mobilité urbaine durable, tout en réduisant les contraintes techniques, environnementales et économiques associées aux technologies actuelles.

Ce projet a été mené en collaboration avec les écoles HES-So de Yverdon et de Bienne. Les laboratoires IESE et Energy Storage Center avec leur infrastructure ont permis d'atteindre tous les objectifs du projet. L'IESE a optimisé le modèle magnétique par éléments finis des moteurs et testé les différents prototypes. Durant toute la phase de développement, nous avons réduit les pertes induites par 3.75 afin d'atteindre une plage étendue à haut rendement de 84% et un rendement maximal de 90%.

Avec BFH, nous avons pu développer un modèle physique de la batterie. Ce modèle permet tout d'abord de connaître la variation de capacité en fonction du nombre de cycles, en fonction de la température ambiante et du courant. Puis, grâce à ce modèle, Shematic a pu développer un calculateur d'autonomie qui permet à l'utilisateur de connaître avec une précision de 99.5% l'autonomie restante en kilomètre. C'est un avantage pour l'utilisateur qui ne peut plus souffrir de "range anxiety", le phénomène qui freine le plus l'usage des véhicules électriques. Un réseau de neurones a été entraîné pour affiner le modèle pendant que les véhicules circulent sur la route.

FREA est une solution complète qui permettra aux constructeurs de véhicule de bénéficier d'un groupe motopropulseur avec un rendement maximal de 90%, une autonomie de 100km avec un affichage fiable permettant de donner confiance aux utilisateurs et une solution plug and play qui supprime toutes les interfaces électriques et mécanique lors de la construction.

Pour conclure, FREA le groupe motopropulseur pour véhicules légers est composé d'un moteur développant 60 Nm, une batterie modulaire et un estimateur d'autonomie restante avec une erreur de 0.5%.

Zusammenfassung

Elektrische Leichtnutzfahrzeuge (VULe) gewinnen angesichts der steigenden Anforderungen an Nachhaltigkeit, Emissionsreduzierung und die städtische Logistik zunehmend an Beliebtheit. Diese Fahrzeuge, die hauptsächlich für die Zustellung auf der letzten Meile oder für städtische Dienstleistungen genutzt werden, stellen eine Zwischenlösung zwischen E-Bikes und herkömmlichen Nutzfahrzeugen dar. Ihre Verbreitung wird jedoch weiterhin durch verschiedene technische und wirtschaftliche Einschränkungen gebremst.

Das Projekt FREA, initiiert von Shematic SA, konzentriert sich auf die Entwicklung einer neuen Generation von kompakten und leistungsstarken Antriebssystemen für elektrische Leichtnutzfahrzeuge (VULe). Dieses Projekt zielt darauf ab, den wachsenden Bedarf an nachhaltiger urbaner Mobilität zu decken und gleichzeitig technische, ökologische und wirtschaftliche Hindernisse zu reduzieren, die mit den aktuellen Technologien verbunden sind.

Das Projekt wurde in Zusammenarbeit mit den HES-So-Hochschulen in Yverdon und Biel durchgeführt. Die Labore IESE und das Energy Storage Center haben mit ihrer Infrastruktur dazu beigetragen, alle Projektziele zu erreichen. Das IESE optimierte das magnetische Modell der Motoren mittels Finite-Elemente-Methode und testete die verschiedenen Prototypen. Während der gesamten Entwicklungsphase



konnten wir die induzierten Verluste um den Faktor 3,75 reduzieren und einen erweiterten Wirkungsgradbereich mit einer Effizienz von 84 % und einem maximalen Wirkungsgrad von 90 % erreichen.

In Zusammenarbeit mit der BFH wurde ein physikalisches Modell der Batterie entwickelt. Dieses Modell ermöglicht zunächst, die Kapazitätsänderung in Abhängigkeit von der Anzahl der Ladezyklen, der Umgebungstemperatur und des Stroms zu bestimmen. Auf Basis dieses Modells konnte Shematic einen Reichweitenrechner entwickeln, der es dem Nutzer erlaubt, die verbleibende Reichweite mit einer Genauigkeit von 99,5 % in Kilometern anzugeben. Dies bietet dem Nutzer den Vorteil, dass er nicht mehr unter der sogenannten „Reichweitenangst“ (Range Anxiety) leiden muss – einem der Haupthemmnisse für den Einsatz von Elektrofahrzeugen.

Ein neuronales Netzwerk wurde trainiert, um das Modell weiter zu verfeinern, während die Fahrzeuge auf der Straße unterwegs sind. FREA ist eine vollständige Lösung, die es Fahrzeugherstellern ermöglicht, von einem Antriebssystem mit einem maximalen Wirkungsgrad von 90 %, einer Reichweite von 100 km und einer zuverlässigen Anzeige zu profitieren, die das Vertrauen der Nutzer stärkt. Zudem bietet FREA eine Plug-and-Play-Lösung, die alle elektrischen und mechanischen Schnittstellen bei der Fahrzeugkonstruktion eliminiert.

Abschließend lässt sich sagen, dass FREA, das Antriebssystem für Leichtfahrzeuge, aus einem Motor mit 60 Nm Drehmoment, einer modularen Batterie und einem Reichweitenschätzer besteht, der eine Fehlertoleranz von nur 0,5 % aufweist.

Summary

Light Electric Vehicles (LEV) are gaining popularity in the context of increasing demands for sustainability, emission reduction, and urban logistics needs. These vehicles, primarily used for last-mile deliveries or urban services, represent an intermediate solution between electric bicycles and conventional utility vehicles. However, their adoption is still hindered by several technical and economic limitations.

The FREA project, initiated by Shematic SA, focuses on developing a new generation of compact and high-performance propulsion systems for LEV. This project addresses the growing need for sustainable urban mobility while reducing the technical, environmental, and economic constraints associated with current technologies.

The project was conducted in collaboration with the HES-So schools in Yverdon and Biel. The IESE and Energy Storage Center laboratories, with their infrastructure, facilitated the achievement of all project objectives. IESE optimized the finite element magnetic model of the motors and tested the various prototypes. Throughout the development phase, we reduced induced losses by a factor of 3.75 to achieve an extended operating range with an efficiency of 84% and a maximum efficiency of 90%.

In collaboration with BFH, we developed a physical model of the battery. This model first allows for understanding capacity variation based on the number of cycles, ambient temperature, and current. Subsequently, using this model, Shematic developed a range estimator that enables users to know the remaining range in kilometers with 99.5% accuracy. This is a significant advantage for users, who no longer need to experience "range anxiety," the phenomenon that most hinders the use of electric vehicles. A neural network was trained to refine the model as the vehicles operate on the road.

FREA is a complete solution that will enable vehicle manufacturers to benefit from a powertrain with a maximum efficiency of 90%, a range of 100 km with reliable display features that inspire user confidence, and a plug-and-play solution that eliminates all electrical and mechanical interfaces during construction.

In conclusion, FREA, the powertrain for light vehicles, consists of a motor delivering 60 Nm of torque, a modular battery, and a range estimator with a margin of error of only 0.5%.



Messages clés («Take-Home Messages»)

- Une communication claire de l'autonomie restante en kilomètre permet aux usagers de petits véhicules électriques ne plus avoir le "range anxiety".
- La modularité du powertrain est un atout essentiel pour répondre aux besoins des constructeurs.
- Pour économiser de l'énergie, il est important de dimensionner des motorisations dédiées à l'application concernée.
Dans l'industrie, on pourrait imaginer des systèmes de ventilation des rendements sur les moteurs allant vers 90% au lieu des 50% actuel.
- Il est possible d'industrialiser en Suisse une solution dédiée présentant 90% de rendement sur une plage élargie qui convient à un grand nombre de véhicules légers et des besoins dans l'industrie.



Table des matières

Résumé.....	3
Zusammenfassung.....	3
Summary	4
Messages clés («Take-Home Messages»)	5
Table des matières	6
Liste des illustrations	8
Liste des tableaux	10
Liste des abréviations.....	11
1 Introduction.....	12
1.1. Contexte et motivation.....	12
1.2. Objectifs du projet.....	14
2 Activités, méthodes, résultats et discussions	16
2.1. WP1: Amélioration électrique	17
2.1.1. Activités réalisées	17
2.1.2. Résultats du WP1:.....	19
2.2. WP2 : Amélioration électromagnétique et mécanique	20
2.2.1. Activités réalisés WP2_T2.1:.....	20
2.2.2. Résultats du WP2_T2.1.....	22
2.2.3. Activités réalisés WP2_T2.2:.....	24
2.2.3.1. Moteur 1.....	24
2.2.3.1.1. Mesure des résistances de phase.....	25
2.2.3.1.2. Mesures en génératrice à vide	26
2.2.3.1.3. Mesures du moteur en charge.....	29
Spécifications.....	29
Conditions de tests	29
Matériel et instruments de tests.....	29
Description du test.....	29
Résultats.....	30
2.2.3.2. Moteur N°2 avec Structure Halbach	32
2.2.3.2.1. Mesure des résistances de phase.....	33
Conditions de tests	33
Matériel et instruments de tests.....	33
Description du test.....	33
Résultats.....	33
Commentaires	33
2.2.3.2.2. Mesures en génératrice à vide	34



<i>Spécifications</i>	34
<i>Conditions de tests</i>	34
<i>Matériel et instruments de tests</i>	34
<i>Description du test</i>	34
<i>Résultats</i>	35
2.2.3.2.3. Mesures du moteur en charge.....	37
<i>Spécifications</i>	37
<i>Conditions de tests</i>	37
<i>Matériel et instruments de tests</i>	37
<i>Description du test</i>	37
<i>Résultats</i>	38
2.2.3.3. Comparaison et discussion des résultats du WP2_T2.2.....	40
2.2.4. Activités réalisés WP2_T2.3:.....	41
2.2.4.1. Modifications apportées.....	42
2.2.4.2. Mesures sur banc de tests.....	44
2.3. WP3 : SmartBMS, calculateur d'autonomie en temps réel	47
2.3.1. Activités réalisées WP3_T3.1 : Réalisation du modèle numérique du pack batterie à partir de données expérimentales	47
2.3.1.1. Réception des cellules.....	47
2.3.1.2. Comportement de la tension	48
2.3.1.3. Enhanced self-correcting modèle	48
2.3.1.4. Comportement de l'OCV.....	49
2.3.1.5. Potentiel dû à l'effet d'hystéresis	50
2.3.1.6. Estimations des résistances et des constantes de temps	50
2.3.1.7. Filtre étendu de Kalman.....	53
2.3.1.8. Prévoir les états futurs	53
2.3.1.9. Mise à jour des états d'estimation	54
2.3.1.10. Résultats en Laboratoire	56
2.3.1.11. Conversion de l'algorithme en langage C	59
2.3.2. Activités réalisées WP3_T3.2 : Développement de logiciel et interface UX/UI	60
2.3.2.1. Logiciel de prédiction de l'autonomie	60
2.3.2.2. Architecture de l'interface UxUi	62
3 Conclusions et perspectives.....	63
3.1. Leçons tirées des résultats du projet FREIA.....	63
3.2. Estimation et appréciation des résultats.....	64
3.3. Prochaines étapes et mise en œuvre future	64
4 Bibliographie.....	65



Liste des illustrations

Figure 1 : Véhicules de la catégorie L	12
Figure 2 : Emission totales des véhicules de transport de marchandises à Genève	13
Figure 3 : Emissions de CO2 pour un VUL selon différentes motorisations	13
Figure 4 : Modèle du PCB du contrôleur moteur.....	17
Figure 5 : premier prototype du contrôleur moteur.....	18
Figure 6 : Mesure du bruit sur le premier prototype	18
Figure 7 : Mesure du bruit après modifications sur le proto 2	19
Figure 8 : Contrôleur moteur dédié à FREA.....	19
Figure 9 : Section du moteur de FREA avec un aimant multipolaire	20
Figure 10 : Visualisation des champs magnétiques au rayon de 5.3 mm.....	21
Figure 11 : Visualisation des champs magnétiques en 2 mm et 12 mm.....	21
Figure 12 : Recherche du rayon optimal	21
Figure 13 : Représentation des topologies de FREA étudiées	22
Figure 14 : Comparaison du couple électromagnétique	22
Figure 15 : Couple électromagnétique en fonction de l'épaisseur de l'aimant multipolaire	23
Figure 16 : Représentation de l'épaisseur de l'aimant multipolaire.....	23
Figure 17 : prototype de FREA 1.....	24
Figure 18 : Description de l'installation.....	26
Figure 19 : Caractéristique de la tension induite (moteur N°1)	27
Figure 20 : Allure des tensions induites composées (moteur N°1)	28
Figure 21 : Spectre de la tension induite composée (moteur N°1)	28
Figure 22 : Schéma de principe de l'essai en moteur	29
Figure 23 : Rendement en fonction du couple-vitesse (Moteur N°1, $U_{DC} = 48V$, $I_{eff} = 100 A$)	30
Figure 24 : Puissance mécanique en fonction du couple-vitesse (Moteur N°1, $U_{DC} = 48V$, $I_{eff} = 100 A$)	30
Figure 25 : Constante de couple (Moteur N°1)	31
Figure 26 : Allure et FFT du courant de phase dans le moteur N°1	31
Figure 27 : Moteur N°1 fournit par la société Shematic SA	32
Figure 28 : Schéma de principe de l'essai en génératrice à vide	34
Figure 29 : Caractéristique de la tension induite (moteur N°2)	35
Figure 30 : Allure des tensions induites composées (moteur N°2)	36
Figure 31 : Spectre de la tension induite composée (moteur N°2)	36
Figure 32 : Schéma de principe de l'essai en moteur	37
Figure 33 : Rendement en fonction du couple-vitesse (Moteur N°2, $U_{DC} = 48V$, $I_{eff} = 100 A$)	38
Figure 34 : Puissance mécanique en fonction du couple-vitesse (Moteur N°2, $U_{DC} = 48V$, $I_{eff} = 100 A$)	38



Figure 35 : Constante de couple (Moteur N°2)	39
Figure 36 : Allure et FFT du courant de phase dans le moteur N°2	39
Figure 37 : Décomposition de l'évolution des pertes fer et frottement-ventilation calculées en fonction de la vitesse de rotation du moteur FREA	41
Figure 38 : Position des parties magnétiques (stator + rotor)	42
Figure 39 : Position des roulements à l'arrière du moteur	42
Figure 40 : Vue de l'élargissement des épanouissements des dents au stator (18° à gauche, 27° à droite)	43
Figure 41 : Induction dans les aimants (18° à gauche, 27° à droite)	43
Figure 42 : Nouveau rotor du moteur FREA V5	43
Figure 43 : Nouveau rotor du moteur FREA V5 (vue détaillée des aimants laminés)	44
Figure 44 : Allure des tensions induites composées à 428 [tr/min] (FREA V5)	44
Figure 45 : Spectre de la tension de phase à 428 [tr/min] (FREA V5)	45
Figure 46 : Pertes frottement et ventilation + pertes fer en fonction de la vitesse de rotation (FREA V5)	45
Figure 47 : Cartographie du rendement (FREA V5, UDC = 48V, $I_{eff} \leq 130$ A)	46
Figure 48 : Comparaison de la plage de rendement supérieur à 87 % entre le moteur FREA V5 et une référence du marché	46
Figure 49 : test de capacité	48
Figure 50 : Enhanced self- correcting modèle	49
Figure 51 : La courbe de l'OCV d'une cellule NMC	49
Figure 52 : Hysteresis potential effect (fitted)	50
Figure 53 : Comportement du voltage à la suite d'une pulse de courant	51
Figure 54 : Test à pulsation effectué sur la cellule NMC VTC-6	51
Figure 55 : L'approche de l'EKF	53
Figure 56 : Vue générale du fonctionnement de l'algorithme	56
Figure 57 : Estimation du SOC via un profil WLTP à différentes valeurs de SOC à 25°C	57
Figure 58 : Estimation du SOC via un profil WLTP à différentes valeurs de SOC à 10°C	57
Figure 59 : Estimation du SOC via un profil WLTP à différentes valeurs de SOC à 45°C	58
Figure 60 : Estimation du SOC via un profil WLTP à différentes valeurs de SOC à 0°C	58
Figure 61 : Vue générale du fonctionnement de l'algorithme en C	59
Figure 62 : Architecture du système de collecte de datas	60
Figure 63 : Visualisation des données collectées	61
Figure 64 : Application mobile permettant de savoir l'autonomie restante et l'état du Yakbike	62
Figure 65 : Corrélation entre les points de fonctionnement d'un Yakbike et le rendement d'un moteur FREA	63



Liste des tableaux

Tableau 1: Liste des objectifs et des indicateurs de performances	14
Tableau 2 : Comparaison des rendements max sur les moteurs vendus pour des VULe	15
Tableau 3 : Objectifs des contributions environnementales de FREA	16
Tableau 4 : Division du projet en WorkPackage	16
Tableau 5 : Dimensions générales de FREA	24
Tableau 6 : Résistance de phase du moteur 1	25
Tableau 7 : Valeurs mesurées lors de l'essai en génératrice à vide	27
Tableau 8 : Dimensions générales du moteur N°2	32
Tableau 9 : Valeurs mesurées lors de l'essai en génératrice à vide	35
Tableau 10 : Comparaison des moteurs mesurés	40



Liste des abréviations

OFEN	Office fédéral de l'énergie
VULE	Véhicule Utilitaire Léger électrique
BMS	Système de gestion de la batterie
CCCV	Courant Constant. ; Courant Constant Voltage Constant. ; Voltage constant
EIS	Spectroscopie d'Impédance Électrochimique
EKF	Extended Kalman Filter
ESC	Enhanced self-correcting
NMC	Lithium-Nickel-Manganese_Cobalt_Oxide
OCV	Tension en circuit ouvert
SOC	State of Charge
WLTP	Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure



1 Introduction

1.1. Contexte et motivation

L'amélioration de la mobilité urbaine est cruciale pour le développement durable d'une ville. Un transport de personnes, des biens et des services sans émission est essentiel pour accroître le bien-être des citadins. Les véhicules électriques légers ont été identifiés comme une solution appropriée pour une mobilité urbaine durable par plusieurs études européennes. En effet, ces véhicules permettent de réduire les temps de trajet, la congestion, la pollution de l'air et le bruit. Pour atteindre les résultats souhaités, les sociétés de livraison telles qu'Ecomotrice SA, les sociétés de services de mobilité comme Cycloo Move et les fabricants tels que KYBURZ et Yakbike commencent à modifier leur approche du transport de marchandises et de personnes.

Cependant, afin de garantir leurs missions sur un grand rayon d'action, ces véhicules nécessitent un groupe motopropulseur compact, performant et fiable. Généralement, les petits véhicules de transport utilisent des moteurs électriques de 250 W avec une ancienne technologie de batterie. En conséquence, ils sont limités à une vitesse d'environ 45 km/h, ont des rayons d'action faible inférieure à 50 km, une charge utile faible inférieure à 150 kg, et des coûts d'entretien élevés. Ces conditions rendent difficile l'utilisation des VULe pendant une journée complète. De plus, le phénomène de "range anxiety" chez les utilisateurs potentiels, limite l'adoption à grande échelle de ces véhicules électriques légers comme outil logistique alors qu'ils présentent des meilleures performances lors de livraisons sur le dernier kilomètre [1].

Pour le transport des personnes, la majorité des efforts de réduction d'émission de polluants est dirigé vers les véhicules automobiles. Il est important de considérer les véhicules de catégorie L (*Figure 1*).



Figure 1 : Véhicules de la catégorie L

Malgré leur taille réduite, ces véhicules ont des émissions de CO₂ environ 11 fois plus élevées et des émissions de NO_x environ 6 fois plus élevées que les voitures particulières à essence. Bien qu'utilisant moins de carburant par kilomètre, ils polluent davantage l'environnement par kilogramme de carburant consommé malgré la mise en œuvre de normes Euro 6 plus strictes [2].

Concernant le transport de marchandises en ville de Genève, les VUL émettent 70% des émissions de CO₂ (Figure 2). Le changement de motorisation d'un VULe permet de réduire les émissions de CO₂ de 30 à 50% et la conversion en VULe type cargobike permet 96% de réduction des émissions de CO₂ (Figure 3).

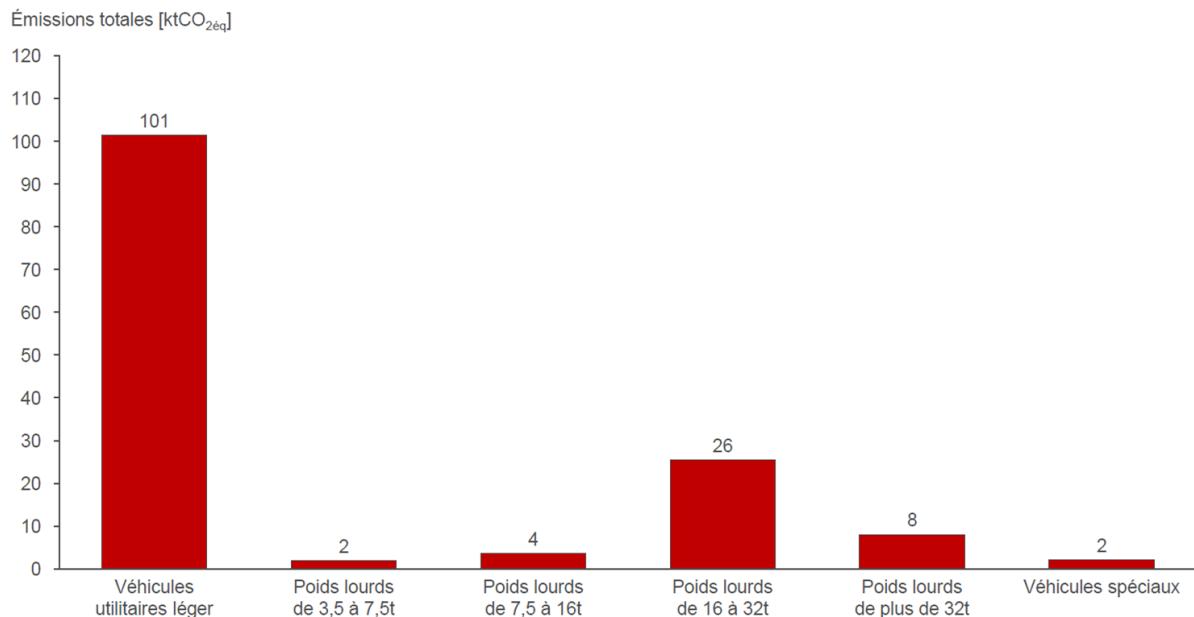


Figure 2 : Emission totales des véhicules de transport de marchandises à Genève

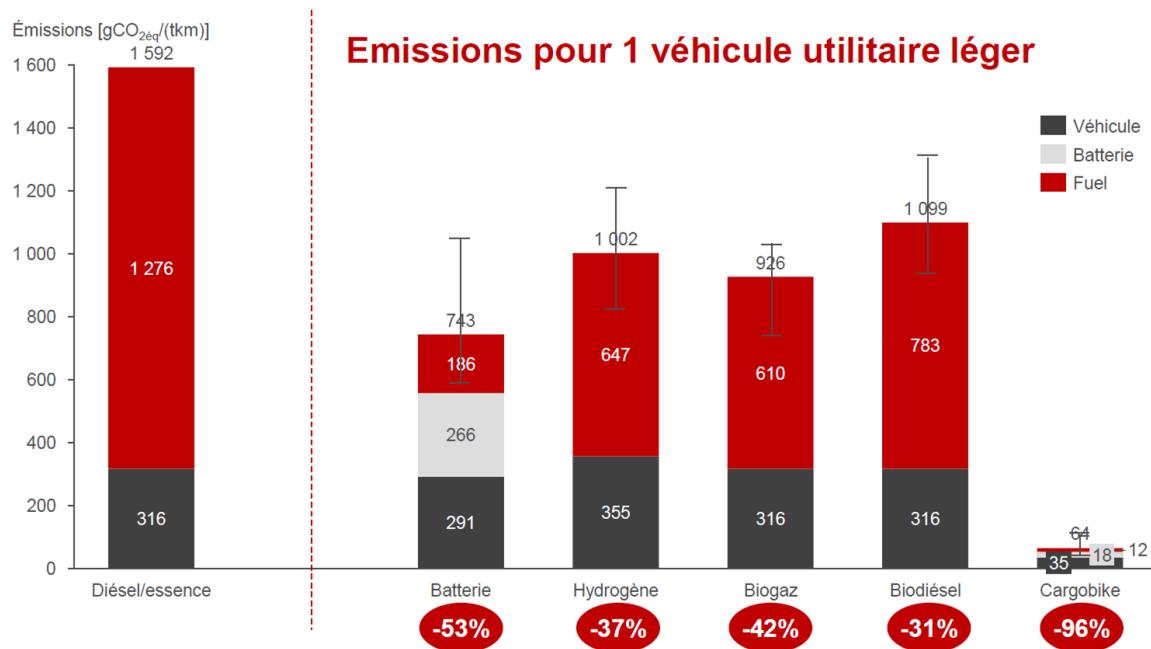


Figure 3 : Emissions de CO₂ pour un VUL selon différentes motorisations

Pour une amélioration de l'environnement et une meilleure utilisation de l'énergie en Suisse, il est essentiel d'utiliser plus les véhicules de catégorie L et de les équiper avec une solution électrique adaptée à l'usage urbain et répondant aux besoins de la logistique urbaine.

L'objectif principal est de fournir sur le marché un moteur électrique pouvant travailler dans toute sa plage de fonctionnement en étant dans sa zone à haut rendement. Ceci permet de consommer moins d'énergie et d'émettre moins d'énergie grise dans le cycle de vie du véhicule. De plus, l'utilisation d'un



moteur compact, à très forte densité de puissance, spécifiquement optimisé pour les besoins du véhicule permet de réduire largement la masse du système d'entraînement électrique ce qui est bénéfique pour augmenter l'efficacité et l'autonomie du véhicule.

Le projet, basé sur cette approche technologique, est en parfaite adéquation avec les priorités actuelles de la recherche de l'OFEN en présentant un système de propulsion ultra efficace selon le cycle WLTC [3]. FREA aura un impact généralisé, fournissant un mode de propulsion fiable, plus puissant, efficace, durable et silencieux.

1.2. Objectifs du projet

L'objectif principal du projet est de permettre à tous les véhicules utilitaires légers d'assurer leurs missions en proposant une motorisation électrique performante avec une prédition du rayon d'action. Ainsi, il sera possible de transporter des biens sans émission à travers les villes suisses et du monde entier sans "*range anxiety*".

Les principaux buts du projet sont les suivants :

- développer, dimensionner, simuler, optimiser, réaliser et tester FREA en se basant sur l'expérience acquise avec le premier prototype ;
- mesurer les performances, les pertes et le rendement dans les différentes conditions de fonctionnement en laboratoire et sur le terrain en installant FREA dans un Yakbike ;
- mesurer les performances et le rendement dans les mêmes conditions de tests, pour comparaison, avec une variante standard de moteur utilisé dans ce marché ;
- affiner et confirmer le modèle physique de la batterie utilisée pour prévoir la consommation d'un VULE sur un parcours et l'implémenter dans le SmartBMS.

La liste des objectifs techniques vérifiables ainsi que les actions à mener pour satisfaire les objectifs sont présentés dans le *Tableau 1*.

Objectifs techniques	Indicateurs clés de performance
Développements: <ol style="list-style-type: none">1. Onduleur intégré. Développer et tester des prototypes d'onduleurs miniatures.2. Reconfiguration du bobinage pour atteindre la vitesse optimale3. Représenter sur une carte les courbes de niveau de SOC pour visualiser le rayon d'action.4. Atteindre 90% de rendement sur une plage étendue afin d'être efficient dans un cycle urbain	<ol style="list-style-type: none">1. Un onduleur miniaturisé robuste et résistant aux températures supérieures à 150 ° C.2. Bobinage préformé, 4000 rpm, SCu > 50%3. Erreur < 5% entre le SOC prédit et réel4. Mesurer un rendement de 90% sur 25% de la plage
Test et amélioration <ol style="list-style-type: none">1. Comparatif sur banc de test et sur le terrain entre FREA et les moteurs utilisés sur le marché.	<ol style="list-style-type: none">1. Obtenir une combinaison optimale de moteur électrique et de batterie avec les caractéristiques idéales de FREA : couple élevé à 50 Nm, puissance de 10 kW, autonomie de 100 km et charge utile de 400 kg.

Tableau 1: Liste des objectifs et des indicateurs de performances



Ces objectifs techniques permettront de concevoir un produit qui aura un impact important sur l'efficacité des véhicules de la catégorie L. En effet, en comparant le rendement maximal des moteurs les plus vendus dans le marché des VULe, on peut s'apercevoir que le rendement maximal est compris entre 75% et 85%. Il est possible d'attendre ce rendement maximal lors d'un point de fonctionnement très précis, le VULe est généralement pas longtemps dans cette zone. Dans ce comparatif, les moteurs de Vélo à Assistance Electrique ne sont pas pris en compte car les rendements de ces moteurs sur le vélo sont inférieurs à 60%.

	Kasbauer 0.6 kW	Kesbauer 1.5 kW	ABM DLG100110	ABM DLG100150	Nidec TRA 145-97	Sonceboz CP90	Schematic FREA
Efficacité nominal (%)	78	75	79	81.5	< 84	< 85	< 90
Efficacité selon cycle WLTC (VS FREA)	-12	-15	-11	-8.5	-6	-5	

Tableau 2 : Comparaison des rendements max sur les moteurs vendus pour des VULe

Le travail d'optimisation de FREA permettra de contribuer positivement sur les objectifs de transition énergétique (Tableau 3). D'une part, sur les véhicules légers, il sera possible de réduire la taille de la batterie, de rendre les véhicules électriques plus abordables et de limiter la congestion urbaine en équipant les véhicules intermédiaires.

Objectifs	Contribution	D'ici 2030	D'ici 2050
Accélérer la transition vers une mobilité durable. 	Notre motopropulseur aide les fabricants de véhicule à briser la barrière des performances et des capacités limitées des véhicules électriques légers. Cela accélère l'adoption de cette classe de véhicules. Ces véhicules étant plus petits, ils permettent de diminuer la congestion urbaine.	En supposant un taux de croissance annuel uniforme de 18% jusqu'en 2030, l'énergie cumulée économisée en 2030 sera de 9 GWh	En supposant un taux de croissance annuel uniforme de 9% à partir de 2030, d'ici 2050, l'énergie cumulée économisée sera 150 GWh
Réduire les émissions de CO ₂ en Suisse 	En équipant davantage de véhicules électriques légers, FREA réduira les émissions de CO ₂ qui auraient été libérées par les équivalents du moteur thermique. L'amélioration de l'efficacité du moteur à 97% implique une meilleure utilisation de l'électricité par les VULe. Ceci contribuerait significativement à l'objectif de neutralité carbone d'ici 2050.	De même (sur la base de l'hypothèse ci-dessus), la réduction cumulée de 46 000 tonnes de CO ₂ sera atteinte	De même (sur la base de l'hypothèse ci-dessus), la réduction cumulative de 720 000 tonnes de CO ₂ sera atteinte



Une meilleure qualité de l'air 	L'adoption généralisée de FREA peut aider à réduire de manière significative les émissions de polluants et du bruit en ville.		
---	---	--	--

Tableau 3 : Objectifs des contributions environnementales de FREA

2 Activités, méthodes, résultats et discussions

Pour atteindre les objectifs ambitieux de ce projet, Shematic et ses partenaires divisent le travail en 4 WorkPackage décrits dans le Tableau 4.

WP1	Amélioration électrique
Description :	T1.1 - miniaturisation de l'électronique du contrôleur
WP2	Amélioration électromagnétique et mécanique
Description :	T2.1 - Anneau magnétique pour disposition de rotor T2.2 - Développement d'un rotor léger et durable
WP3	SmartBMS : calculateur d'autonomie en temps réel
Description :	T3.1 – Réalisation du modèle physique de la batterie T3.2 - Développement du logiciel et de l'interface UX/UI
WP4	Tests et validation
Description :	T4.1 – Essais du moteur en laboratoire

Tableau 4 : Division du projet en WorkPackage

Chaque résultat des WorkPachage a été vérifié par un partenaire ou un organisme certifié tel que Eurofins, HEIG-VD et BFH car c'est important pour Shematic de connaitre les réelles performances du powertrain.



2.1. WP1: Amélioration électrique

Ce WorkPackage a pour objectif d'apporter les améliorations nécessaires aux composants électriques de la plateforme FREA et de faciliter son installation sur un véhicule. Le système doit être compact et facile à installer. Les contrôleurs standards utilisés actuellement sont encombrants et ne sont pas optimaux pour les VULe. Un contrôleur miniaturisé a été développé avec une résistance à la température plus élevée afin de pouvoir l'intégrer à l'intérieur du corps du moteur. Cela améliorera la compacité de FREA. La principale complication prévue est la dissipation de la chaleur. En effet, le moteur, le contrôleur ainsi que le réducteur génèrent de la chaleur en fonctionnant.

2.1.1. Activités réalisées

Pour concevoir et réaliser un contrôleur moteur miniaturisé, il est essentiel de suivre une démarche structurée et méthodique. La première étape consiste à analyser les exigences fonctionnelles. Cela inclut la définition des besoins en termes de puissance, de tension, de courant et de résistance thermique pour une utilisation prolongée. Il est également important de déterminer les contraintes d'encombrement afin de s'assurer que le contrôleur pourra s'intégrer dans l'espace disponible dans le moteur, tout en définissant les interfaces électriques nécessaires pour les connexions avec le moteur, la batterie et les autres composants du système.

Une fois les besoins établis, il faut sélectionner les technologies et les composants appropriés. Les MOSFET en carbure de silicium (SiC) ou en nitrate de gallium (GaN) sont idéaux pour leur haute efficacité énergétique et leur résistance thermique. Les substrats pour PCB doivent être capables de supporter des températures élevées, comme les céramiques ou les PCB renforcés. Le choix d'un micro-contrôleur ou d'un FPGA est crucial pour gérer le contrôle moteur, le suivi en temps réel et les algorithmes avancés, tels que le contrôle vectoriel de champ (Field-Oriented Control). Par ailleurs, des capteurs de courant, de température et de position du rotor sont nécessaires pour assurer une opération précise et fiable sous températures élevées.

La conception du circuit commence par une étude préliminaire, incluant des simulations pour valider les choix de composants et les performances attendues. Le schéma électrique doit intégrer un onduleur (convertisseur DC-AC), des régulateurs de tension et des dispositifs de protection contre les surtensions ou surcharges. L'optimisation de la disposition du PCB (Figure 4) est cruciale pour minimiser les pertes et les interférences électromagnétiques (EMI). La gestion thermique joue un rôle essentiel, nécessitant l'inclusion de dissipateurs de chaleur, de plaques thermiques ou d'interfaces conductrices efficaces.

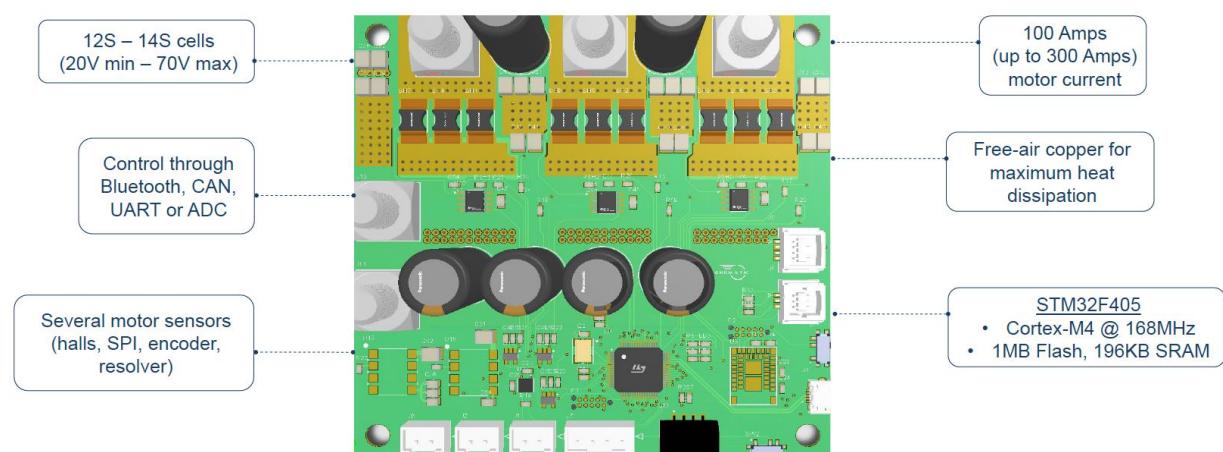


Figure 4 : Modèle du PCB du contrôleur moteur



Le développement du firmware est une étape clé. Les algorithmes avancés comme le contrôle vectoriel doivent être implémentés pour maximiser le rendement et réduire les pertes. La gestion dynamique de l'énergie permet d'optimiser les performances du moteur en fonction des besoins. Des fonctionnalités de diagnostic et de surveillance en temps réel sont nécessaires pour détecter les anomalies et activer les sécurités correspondantes.

Le prototypage (Figure 5) suit la conception. Le PCB est fabriqué et assemblé avec les composants sélectionnés, puis connecté à un moteur et à une batterie pour des tests en laboratoire. Ces tests valident les performances du contrôleur dans des conditions variées, incluant des charges, des tensions et des températures extrêmes. Ensuite, le contrôleur est installé très proche d'un moteur réel pour des tests en conditions opérationnelles. Les performances, la robustesse et la fiabilité sont vérifiées à cette étape.

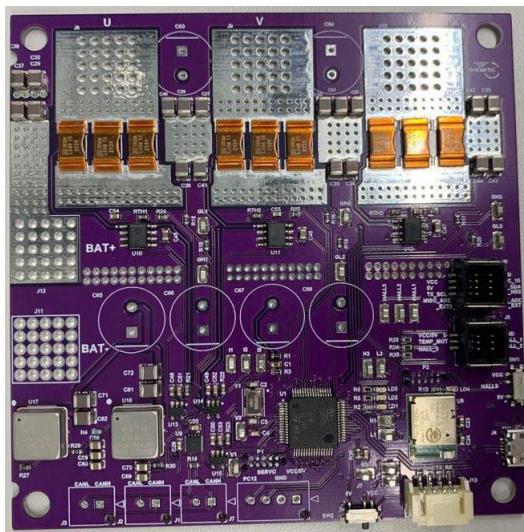


Figure 5 : premier prototype du contrôleur moteur

Malheureusement à cette première étape, le contrôleur n'arrivait pas à monter en tension au-delà de 40V. Un bruit électronique (Figure 6) important générait un mauvais fonctionnement du moteur. Il a été identifié que les composants numériques et analogiques étaient trop proches.

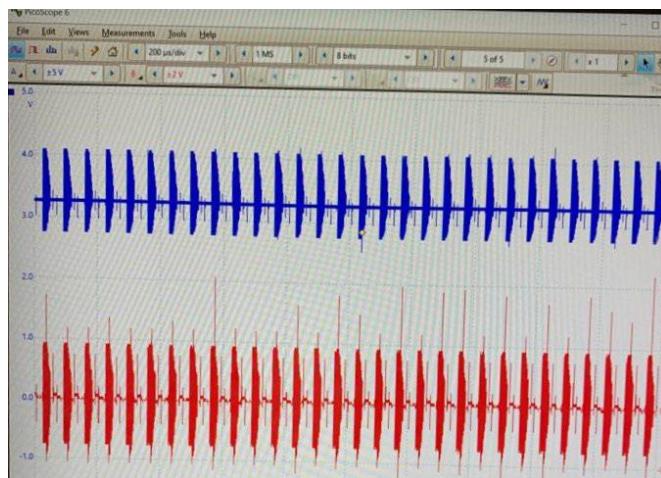


Figure 6 : Mesure du bruit sur le premier prototype



En déplaçant les composants sensibles, en faisant un nouveau routage et en séparant les masses numériques des masses analogiques, il a été possible de supprimer le bruit sur l'alimentation principale, de diminuer le bruit sur l'alimentation électronique de 33% et sur la masse de 70% (Figure 7).



Figure 7 : Mesure du bruit après modifications sur le proto 2

L'optimisation et la miniaturisation (Figure 8) intervient ensuite pour réduire davantage l'encombrement, remplacer les composants redondants et regrouper les fonctions dans des modules intégrés. L'amélioration de la dissipation thermique sans augmentation de la taille globale est également une priorité. Une fois le design optimisé, la préparation à la production d'un prototype peut commencer.

2.1.2. Résultats du WP1:

A la fin de ce WP1, Shematic a réussi à réaliser un contrôleur moteur aux dimensions qui conviennent à un moteur électrique pour VULe. Ce contrôleur moteur est capable de fournir 180 A continu sous 48 V nominal.

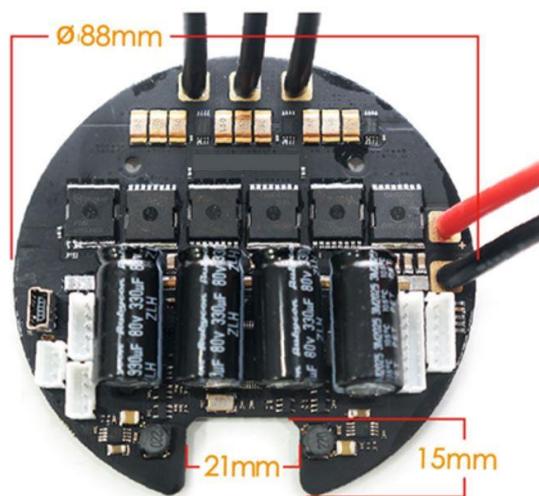


Figure 8 : Contrôleur moteur dédié à FREA

Pour arriver à un tel résultat, Shematic a développé 3 prototypes et abîmé beaucoup de composants de puissance.

Le contrôleur a passé les normes IEC 61000-6-3; IEC 61000-3-2 sur un vélo de type "speedelec" de démonstration dans le centre Eurofins à Rossens.



2.2. WP2 : Amélioration électromagnétique et mécanique

Ce WorkPackage a été consacré aux améliorations électromécaniques afin d'atteindre une meilleure efficacité globale. Shematic veut développer une technologie évolutive pour les moteurs dans la gamme de 1kW à 10kW. Au niveau du rotor, l'objectif est de remplacer la culasse en acier par une alternative plus légère en composite pour améliorer la densité de puissance et l'efficacité. Dans le but de proposer un moteur durable, un rotor utilisant des aimants sans terres rares annulaire sera dimensionné et réalisé. Cette nouvelle variante permet de fabriquer en Europe un rotor performant pour les VULe. Ce lot de travail était sous la responsabilité de l'IESE.

2.2.1. Activités réalisés WP2_T2.1:

L'étude a pour but de modéliser, de simuler et d'analyser les performances du moteur FREA, de la société Shematic SA, avec un seul aimant multipolaire au rotor. L'étude est réalisée avec les logiciels Flux2D et FluxMotor. La partie statorique du moteur reste inchangée par rapport au modèle original fourni par Shematic. Par conséquent, seule la description technique de la partie rotorique est détaillée. La matière de l'aimant est sélectionnée de manière à permettre une magnétisation multipolaire ("plastic bonded"). Les simulations du modèle ont été réalisées sous Flux 2021.1 en 2D. Seule une moitié du modèle a été construite. Une symétrie sur l'axe des X a été réalisée (conditions impaires) afin de minimiser le temps de calcul. Le rotor original a été remplacé par un seul anneau magnétique qui est magnétisé par secteur (14) avec une magnétisation de type "orthoradiale". Cela permet d'avoir les avantages d'un réseau de Halbach tout en simplifiant le montage général du rotor (Figure 9).

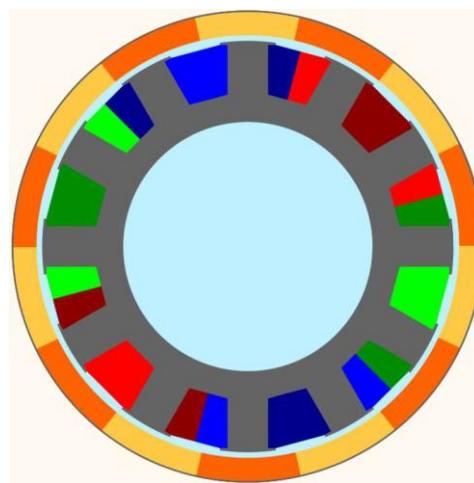


Figure 9 : Section du moteur de FREA avec un aimant multipolaire

Les figures ci-dessous permettent de visualiser la magnétisation orthoradiale des différents secteurs de l'anneau. Le rayon de magnétisation choisi est de 5.3 [mm] (Figure 10).

Les aimants ont un B_r de 0.73 T, pour une perméabilité relative de 1.1. Les aimants choisis sont de type "plastic bounded". Ces variantes n'offrent pas une induction rémanente très élevée. L'épaisseur radiale de l'aimant est de 6 mm. Il s'agit de l'épaisseur minimale recommandée par le fabricant d'aimant Schramberg Magnet (<https://www.magnete.de/de.html>).

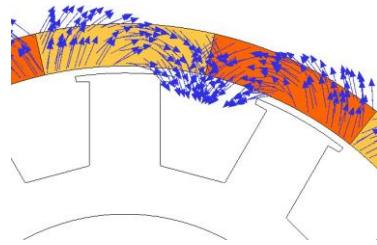


Figure 10 : Visualisation des champs magnétiques au rayon de 5.3 mm

Il est très important de définir le rayon de magnétisation de l'anneau car il permettra qu'il y ait le moins de champs de fuite et donc de maximiser le couple.

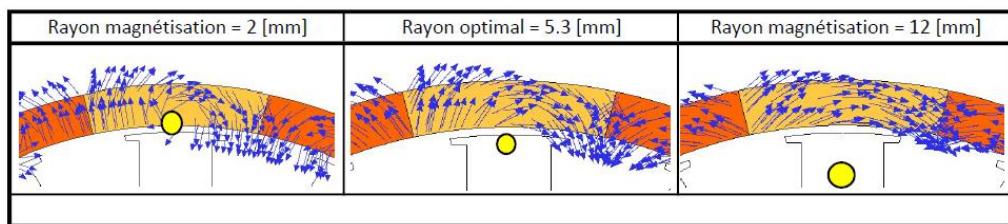


Figure 11 : Visualisation des champs magnétiques en 2 mm et 12 mm

Les premières simulations (Figure 11) ont permis de déterminer que le rayon optimal de magnétisation se situe dans un espace compris entre 5 et 6 mm. Finalement le rayon permettant de maximiser le couple et de réduire l'ondulation de couple est de 5.3 mm (Figure 12).

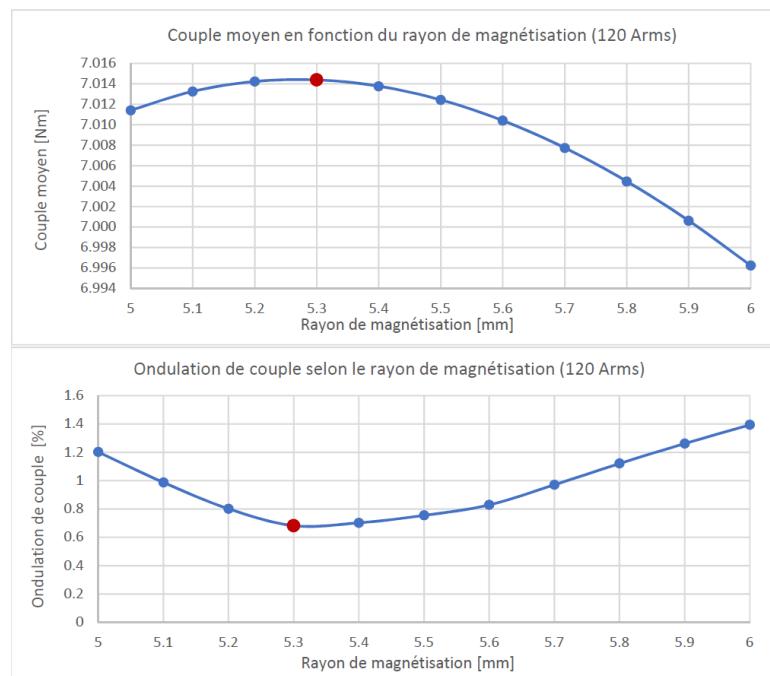


Figure 12 : Recherche du rayon optimal

2.2.2. Résultats du WP2_T2.1

Comparaison entre les deux topologies:

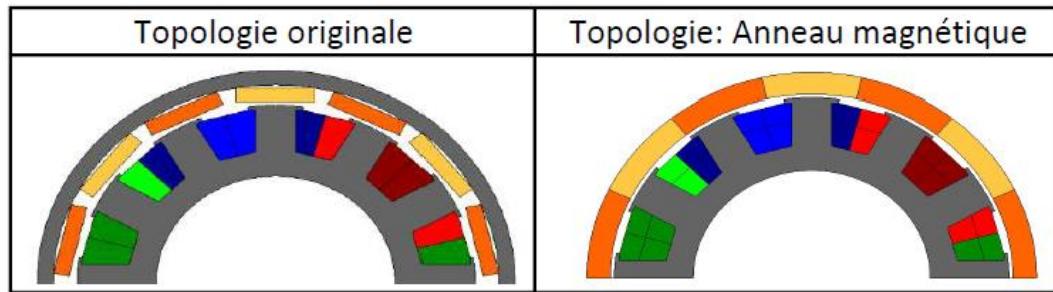


Figure 13 : Représentation des topologies de FREA étudiées

La structure avec un seul aimant multipolaire devrait faciliter le montage des aimants par rapport à une structure en Halbach standard où il faut assembler un grand nombre d'aimants en veillant à respecter la polarité de ceux-ci (Figure 13). Il faut pouvoir fixer l'aimant dans son rotor afin d'assurer l'accouplement. Les aimants NdFeB de type "plastic bounded" n'ont pas un champ rémanent aussi élevé que les aimants "NdFeB frittés". En effet, les premiers ont un B_r de 0.73 T contre 1.32 T pour les seconds, soit 55% plus faible. Par contre, le volume d'aimant est plus important (+82%) avec une magnétisation en Halbach. On note une réduction du couple proche de 30 % par rapport à la version initiale de référence (Figure 14).

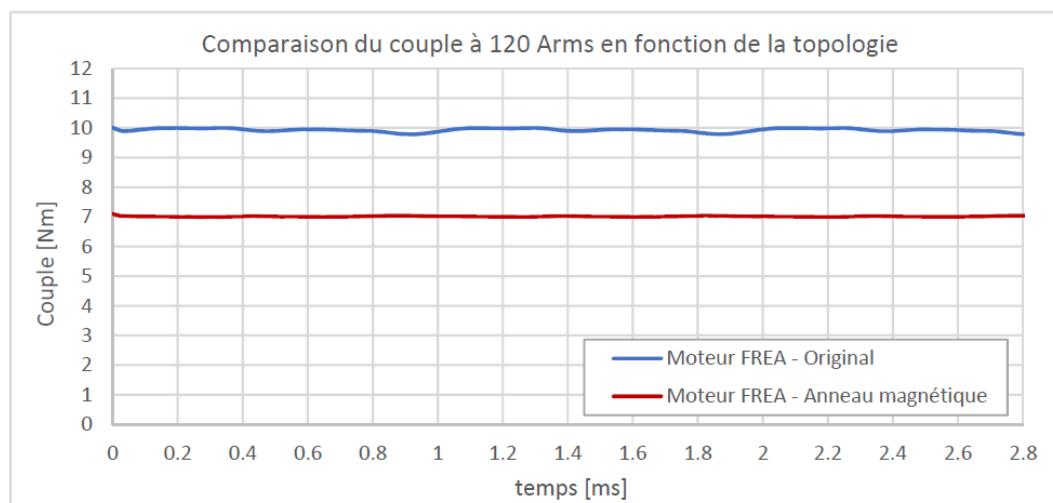


Figure 14 : Comparaison du couple électromagnétique

Pour rattraper cet écart de couple, IESE a cherché l'effet de l'épaisseur de l'aimant multipolaire sur le couple électromagnétique du moteur. Le rayon de magnétisation a été optimisé dans chaque cas afin de réduire l'ondulation de couple tout en conservant un couple moyen le plus élevé possible. Pour obtenir un couple égal à celui du prototype initial du moteur FREA, avec les aimants rectangulaires en NdFeB frittés, il faudrait augmenter l'épaisseur de l'aimant à environ 13 mm (Figure 16). On remarque sur la Figure 15 que le couple n'augmente pas de manière linéaire, en particulier au-delà de 9 mm.

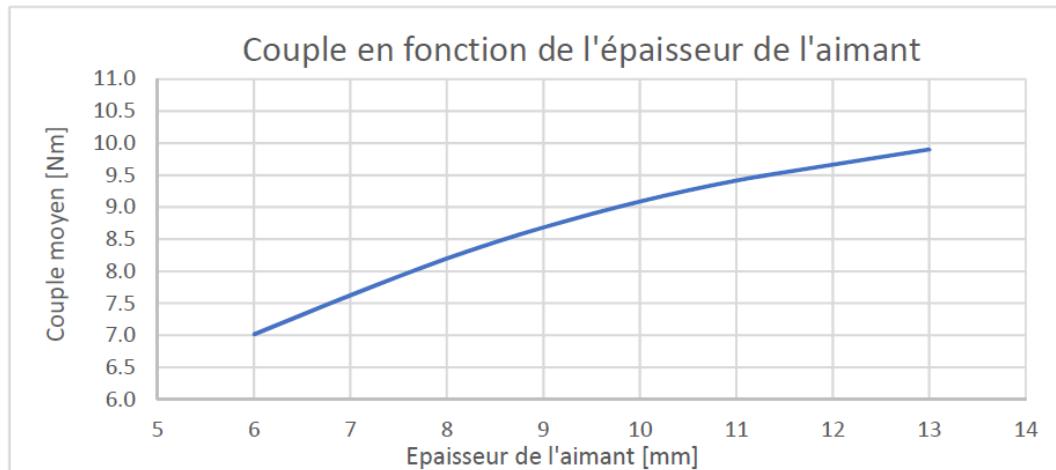


Figure 15 : Couple électromagnétique en fonction de l'épaisseur de l'aimant multipolaire

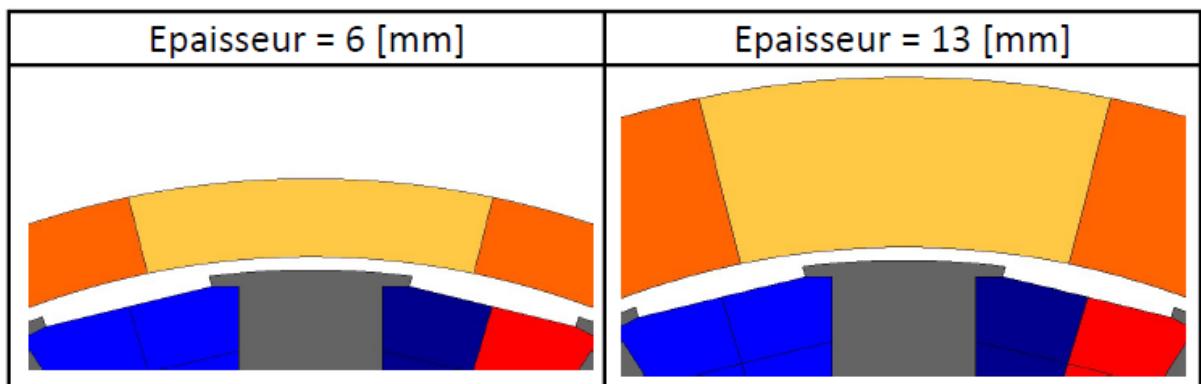


Figure 16 : Représentation de l'épaisseur de l'aimant multipolaire

Suite à une discussion avec plusieurs industriels spécialisés dans le domaine, IESE et Shematic ont décidé de continuer l'optimisation du moteur sur une topologie classique car cette variante est complexe à fabriquer et très longue.



2.2.3. Activités réalisés WP2_T2.2:

Un banc d'essais spécifiquement dédié à ce projet a été mis en service à la HEIG-VD afin de répondre aux critères de tests des différents moteurs. Le choix des appareils de mesure adaptés est fait afin de répondre aux mieux à la précision souhaitée des mesures. Il est nécessaire dans le cadre du projet de garantir une détermination du rendement au pourcent près.

Tout au long du projet, différents moteurs synchrones à aimants à rotor externe ont été fournis par la société Shematic SA. Le but étant de les mesurer et de les caractériser afin de vérifier leurs performances et leurs rendements sur l'ensemble de la plage de fonctionnement.

Dans un premier temps, deux moteurs appelés « moteur N°1 » et « moteur N°2 » ont été mesurés. Le premier est constitué d'aimants permanents rectangulaires fixés sur le rotor. Le deuxième possède des aimants en forme de tuile assemblés selon un réseau de Halbach. Les deux moteurs possèdent le même stator.

Ces prototypes ont pour but d'évaluer l'intérêt de la structure de Halbach pour ce moteur (augmentation du rendement, performances globales améliorées, etc.) par rapport à une solution dite « classique ».

2.2.3.1. Moteur 1

Ce chapitre résume l'ensemble des mesures et les essais réalisés sur le moteur N°1 (Figure 17). Celui-ci est de type synchrone à aimants permanents à rotor externe. Le stator est composé de 24 dents. Le bobinage est réalisé sur toutes les dents. Le moteur est piloté à l'aide de sondes de Hall installées sur le stator.



Figure 17 : prototype de FREA 1

Le rotor est composé de 28 aimants rectangulaires collés au rotor. La structure est en acier.

Les dimensions générales du moteur sont décrites dans le Tableau 5 ci-dessous.

Géométries (mesurées)		Unité	
D_{ext}	Diamètre externe	[mm]	120
L_{tot}	Longueur totale	[mm]	85
M_{tot}	Masse totale	[kg]	2.91

Tableau 5 : Dimensions générales de FREA



2.2.3.1.1. Mesure des résistances de phase

Conditions de tests

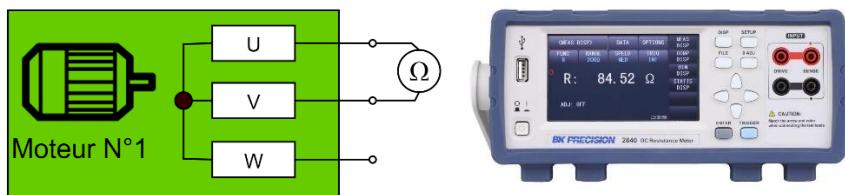
Condition	Valeur	Date
Température ambiante mesurée	21°C	24.01.2022
Humidité relative	Ambiance de laboratoire – B57	
Pression	Ambiance de laboratoire – B57	

Matériel et instruments de tests

Pos.	Instruments	Numéro d'inventaire
1	B&K précision 2840 DC Resistance meter	-

Description du test

Les résistances de phase sont directement mesurées aux bornes du moteur à l'aide du milliohmètre B&K précision 2840 DC. Il s'agit des résistances phase-phase.



Résultats

Résistance phase-phase	Mesure à 21°C [mΩ]	Valeur déduite à 20°C [mΩ]	Résistance de phase [mΩ]
R _{UV}	10.048	10.01	5.00
R _{VW}	10.119	10.08	5.04
R _{UW}	10.108	10.07	5.03

Tableau 6 : Résistance de phase du moteur 1

Commentaires

Les résistances mesurées à une température de 21°C (T₁) sont déduites pour une température de 20°C (T₂) avec la relation suivante :

$$R_{T_2} = R_{T_1} \cdot \frac{235 + T_2}{235 + T_1} \quad [\Omega]$$



2.2.3.1.2. Mesures en génératrice à vide

Spécifications

Le test en génératrice à vide permet de vérifier l'amplitude et l'allure des tensions induites du moteur. L'essai permet également de déterminer le coefficient de tension induite K_u du moteur.

Conditions de tests

Condition	Valeur	Date
Température ambiante mesurée	21°C	30.08.2021
Humidité relative	Ambiance de laboratoire – B57	
Pression	Ambiance de laboratoire – B57	

Matériel et instruments de tests

Pos.	Instruments	Numéro d'inventaire
1	Pupitre d'alimentation Leroy Somer, 7.5 kW	-
2	Moteur d'entrainement	-
3	Oscilloscope Lecroy WaveSurfer 3014	-
4	Sonde de tension différentielle Testec TT-SI-9001	-

Description du test

Le moteur à caractériser est entraîné à l'aide du moteur d'entrainement Emerson (Figure 18). On mesure les tensions induites composées à l'aide de sondes de tension différentielles. L'allure de la tension ainsi que son spectre sont relevés à l'aide d'un oscilloscope. Les essais ont été réalisés pour différentes vitesses de 500 à 4'000 tr/min.

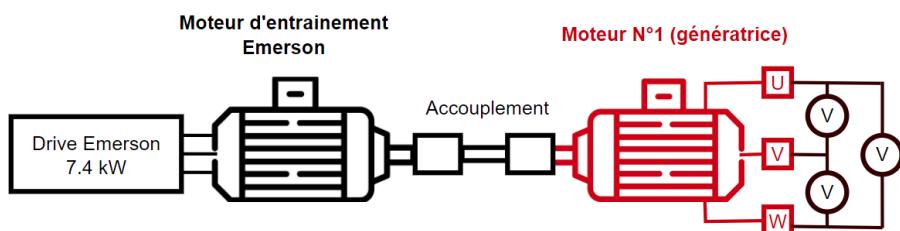


Figure 18 : Description de l'installation



Résultats

Le Tableau 7 résume les différentes valeurs obtenues lors de l'essai en génératrice à vide pour les différentes vitesses choisies. La tension composée moyenne des trois phases est rapportée à la valeur de phase par un rapport de $\sqrt{3}$ afin de calculer le coefficient K_U .

		Moteur N°1		
Vitesse [tr/min]	Vitesse [rad/s]	$U_{i_comp_eff}$ [V]	U_{iph_eff} [V]	K_U moyen [mV _{eff} /rad/s]
500	52.36	4.05	2.34	44.66
1'000	104.72	8.14	4.70	44.88
1'500	157.08	12.23	7.06	44.95
2'500	261.80	20.24	11.69	44.64
3'000	314.16	24.21	13.98	44.49
3'500	366.52	28.32	16.35	44.61
4'000	418.88	32.30	18.65	44.52

Tableau 7 : Valeurs mesurées lors de l'essai en génératrice à vide

Les mesures permettent de tracer les caractéristiques de la tension induite (Figure 19**Erreurs ! Source du renvoi introuvable.**). La pente de la droite représente le coefficient de tension induite K_U .

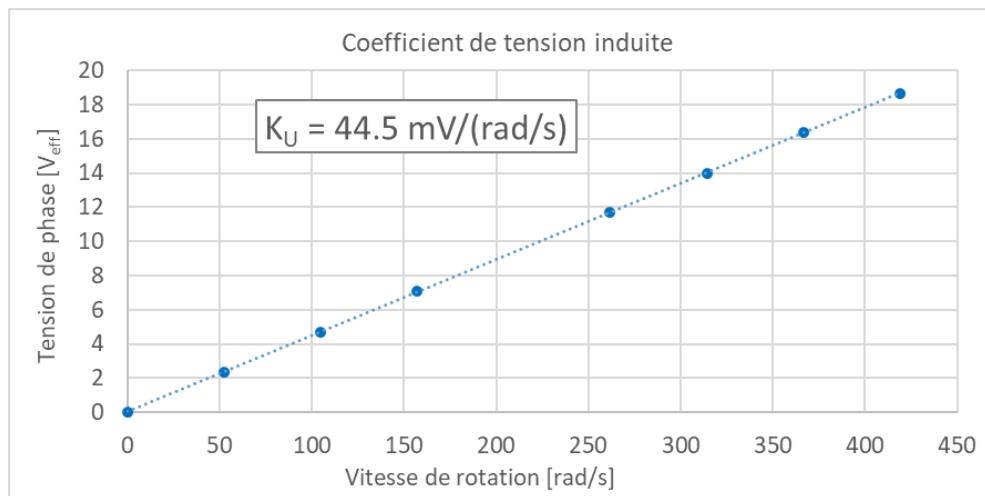


Figure 19 : Caractéristique de la tension induite (moteur N°1)

Pour le moteur N°1, la constante K_U vaut :

$$K_U = 44.5 \text{ [mV}_\text{eff}/(\text{rad/s})]$$



L'allure des tensions induites composées à 1'500 [tr/min], ainsi que le spectre, sont représentés respectivement à la Figure 20 et à la Figure 21.

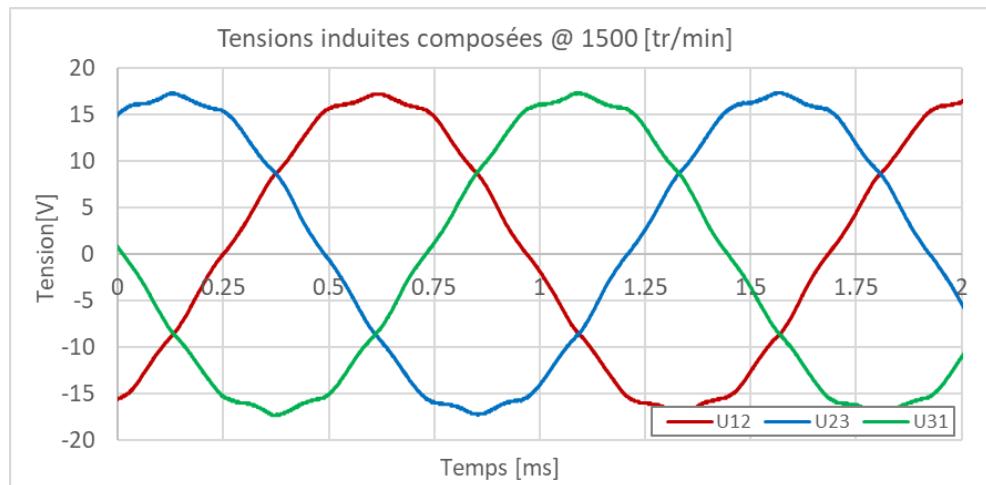


Figure 20 : Allure des tensions induites composées (moteur N°1)

L'allure est relativement bonne et la tension présente des harmoniques relativement faibles. Les harmoniques de rang 5 et 11 atteignent environ 1.8 à 2% de l'amplitude du fondamental.

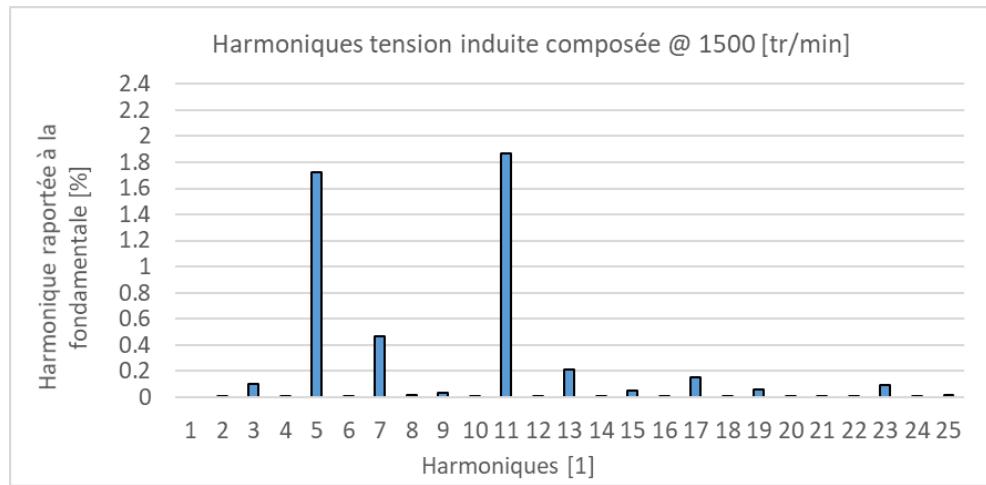


Figure 21 : Spectre de la tension induite composée (moteur N°1)



2.2.3.1.3. Mesures du moteur en charge

Spécifications

Le test du moteur en charge a pour but de caractériser le moteur avec une charge variable sur l'ensemble de sa zone de travail. Le moteur avec l'électronique de régénération est employé en tant que charge variable.

Conditions de tests

Condition	Valeur	Date
Température ambiante mesurée	21°C	12.09.2021
Humidité relative	Ambiance de laboratoire – B57	
Pression	Ambiance de laboratoire – B57	

Matériel et instruments de tests

Pos.	Instruments	Numéro d'inventaire
1	Pupitre d'alimentation Emerson, 7.5 kW	-
2	Couplemètre Magtrol TMB 311	-
3	Analyseur de puissance N4L-PPA3500	-
4	Sondes de courant IT 405-S ULTRASTAB (phases moteur)	-
5	Sonde de courant Chauvin Arnoux E3N (source DC)	

Description du test

Le moteur est testé pour plusieurs points de 100 tr/min jusqu'à sa vitesse maximale possible avec une tension de bus DC de 48 V. Ceci pour des couples mécaniques allant jusqu'au couple maximal atteignable avec un courant de phase de 100 A_{eff}. L'ensemble des grandeurs électriques sont relevées à l'aide de l'analyseur de puissance (Figure 22).

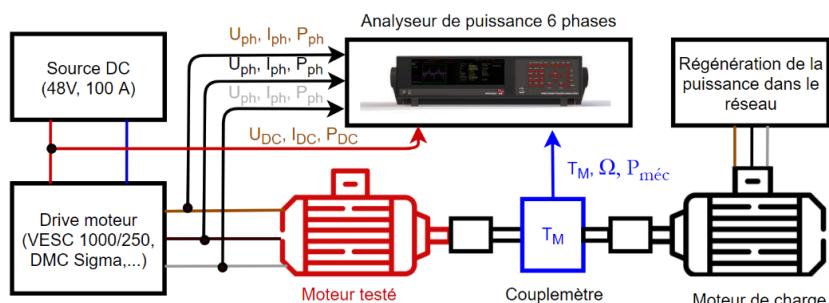


Figure 22 : Schéma de principe de l'essai en moteur

Résultats

La Figure 23 montre le rendement du moteur dans sa zone de travail normale (sans défluxage). Le couple maximal atteignable avec 100 A est de 12 Nm. La vitesse maximale atteignable est d'environ 3700 tr/min et le rendement maximal mesuré atteint 83 %.

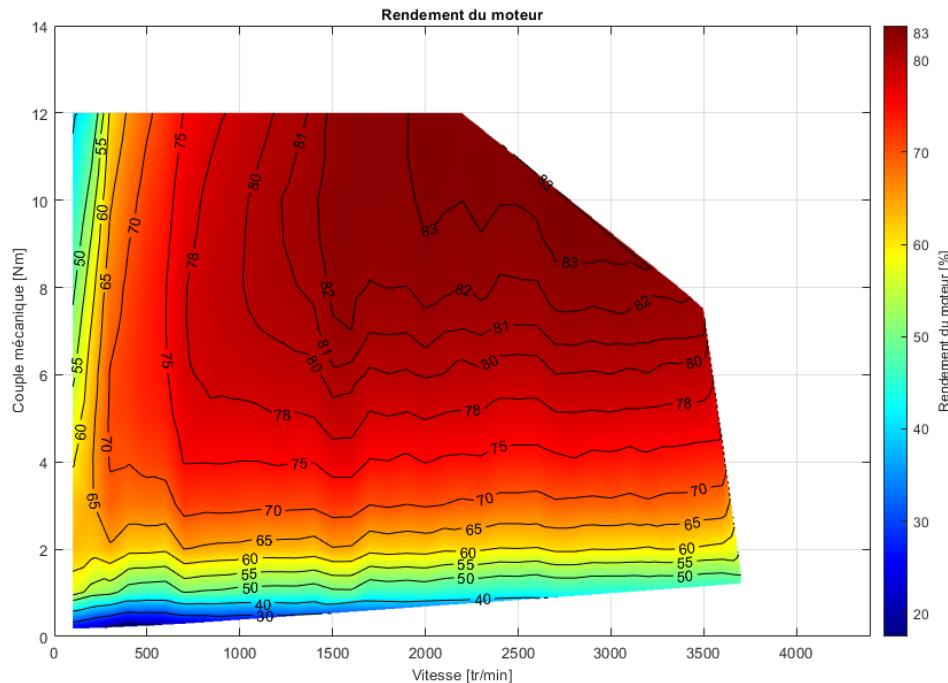


Figure 23 : Rendement en fonction du couple-vitesse (Moteur N°1, $U_{DC} = 48V$, $I_{eff} = 100 A$)

La puissance mécanique maximale fournie par le moteur est d'environ 2500 W (Figure 24).

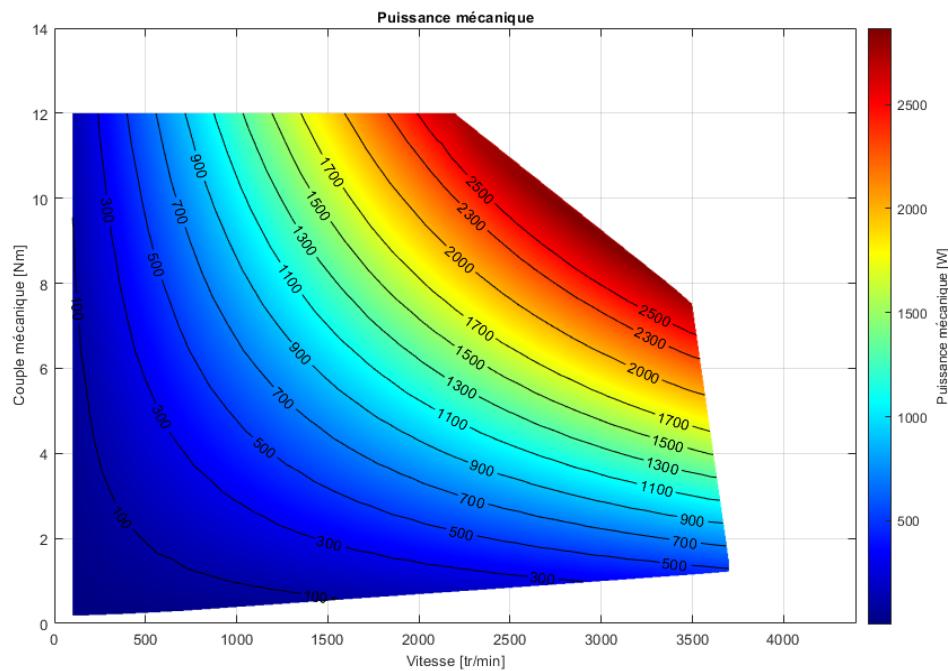


Figure 24 : Puissance mécanique en fonction du couple-vitesse (Moteur N°1, $U_{DC} = 48V$, $I_{eff} = 100 A$)



La caractéristique du couple en fonction du courant, visible à la Figure 25Figure 25, montre que le moteur ne sature pas pour des courants jusqu'à 100 A. La constante de couple peut être déterminée à l'aide d'une régression linéaire ($K_T = 0.130 \text{ Nm/A}$). Il faut éviter de dépasser ces niveaux de courants afin de ne pas surchauffer le moteur. En effet, une température de 95°C a été constatée en surface du moteur après des essais de 1 min.

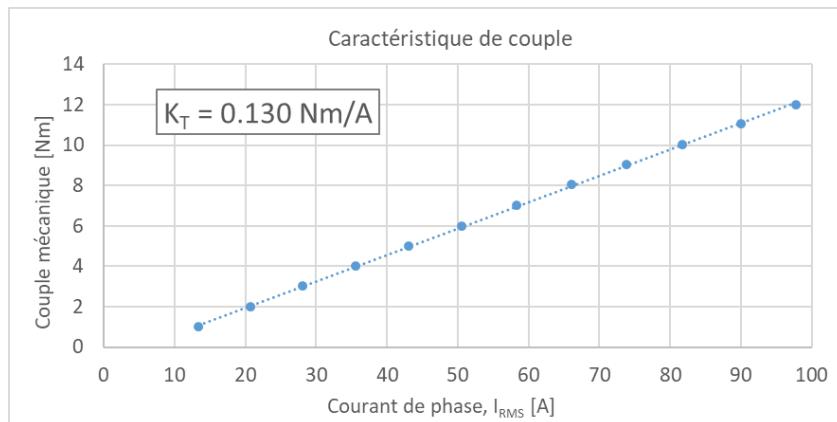


Figure 25 : Constante de couple (Moteur N°1)

La Figure 26 montre une allure typique des courants dans les phases du moteur lors des essais. Les harmoniques de rang 5 et 7 présentent une amplitude respective de 5 et 2.5 %.

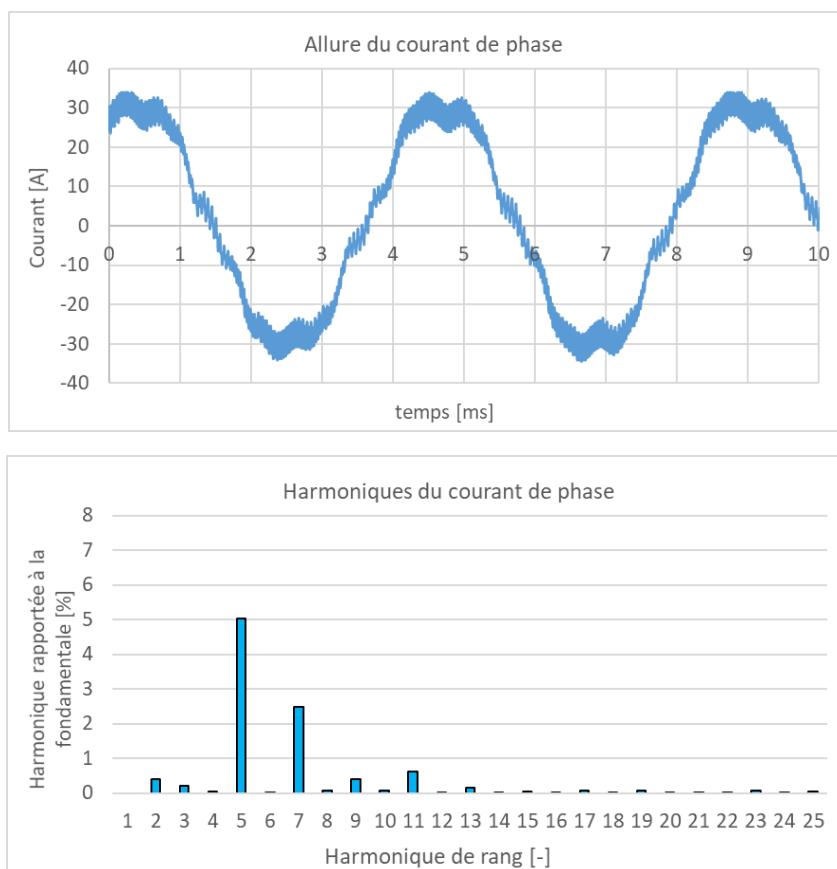


Figure 26 : Allure et FFT du courant de phase dans le moteur N°1



2.2.3.2. Moteur N°2 avec Structure Halbach

Ce chapitre résume l'ensemble des mesures et les essais réalisés sur le moteur N°2 (Figure 27). Celui-ci est de type synchrone à aimants permanents à rotor externe. Il est composé d'une partie statorique identique au moteur N°1. Le stator est composé de 24 dents. Le bobinage est réalisé sur toutes les dents. Le moteur est commandé en position à l'aide de sondes de Hall installées sur le stator.

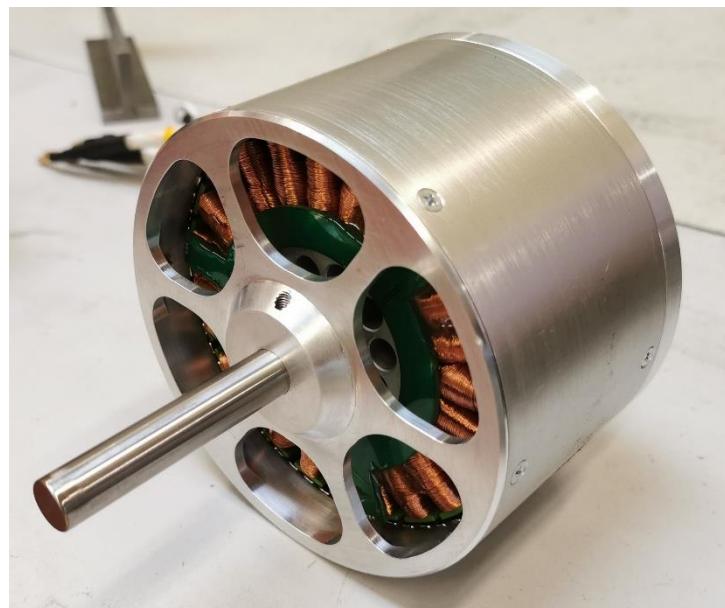


Figure 27 : Moteur N°1 fournit par la société Shematic SA

Le rotor est composé de 56 aimants tuiles collés au rotor formant une structure de Halbach. Cela permet de réaliser une culasse rotorique en aluminium et de réduire de manière significative la masse totale du moteur.

Les dimensions générales du moteur sont décrites dans le Tableau 8.

Géométries (mesurées)		Unité	
D_{ext}	Diamètre externe	[mm]	120
L_{tot}	Longueur totale	[mm]	85
M_{tot}	Masse totale	[kg]	2.63

Tableau 8 : Dimensions générales du moteur N°2



2.2.3.2.1. Mesure des résistances de phase

Conditions de tests

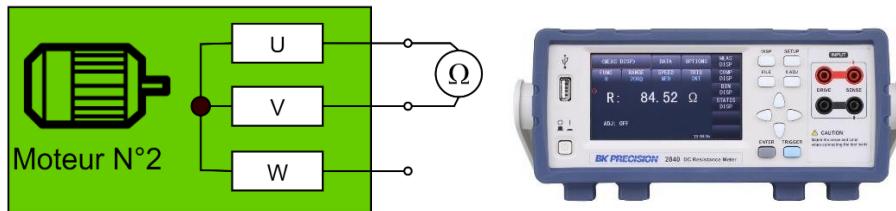
Condition	Valeur	Date
Température ambiante mesurée	21°C	25.02.2022
Humidité relative	Ambiance de laboratoire – B57	
Pression	Ambiance de laboratoire – B57	

Matériel et instruments de tests

Pos.	Instruments	Numéro d'inventaire
1	B&K précision 2840 DC Resistance meter	-

Description du test

Les résistances de phase sont directement mesurées aux bornes du moteur à l'aide du milliohmètre B&K précision 2840 DC. Il s'agit des résistances phase-phase.



Résultats

Résistance phase-phase	Mesure à 21°C [mΩ]	Valeur déduite à 20°C [mΩ]	Résistance de phase [mΩ]
R _{UV}	10.166	10.13	5.06
R _{VW}	10.24	10.20	5.10
R _{UW}	10.23	10.19	5.09

Commentaires

Les résistances mesurées à une température de 21°C (T₁) sont déduites pour une température de 20°C (T₂) avec la relation suivante :

$$R_{T_2} = R_{T_1} \cdot \frac{235 + T_2}{235 + T_1} \quad [\Omega]$$



2.2.3.2.2. Mesures en génératrice à vide

Spécifications

Le test en génératrice à vide permet de vérifier l'amplitude et l'allure des tensions induites du moteur. L'essai permet également de déterminer le coefficient de tension induite K_u du moteur.

Conditions de tests

Condition	Valeur	Date
Température ambiante mesurée	21°C	25.02.2022
Humidité relative	Ambiance de laboratoire – B57	
Pression	Ambiance de laboratoire – B57	

Matériel et instruments de tests

Pos.	Instruments	Numéro d'inventaire
1	Pupitre d'alimentation Emerson, 7.5 kW	-
2	Moteur d'entraînement	-
3	Oscilloscope Lecroy WaveSurfer 3014	-
4	Sonde de tension différentielle Testec TT-SI-9001	-

Description du test

Le moteur à caractérisé est entraîné à l'aide du moteur d'entraînement Emerson (Figure 28). On mesure les tensions induites composées à l'aide de sondes de tension différentielles. L'allure de la tension ainsi que son spectre sont relevés à l'aide d'un oscilloscope. Les essais ont été réalisés pour différentes vitesses comprises entre 500 et 4'000 [tr/min].

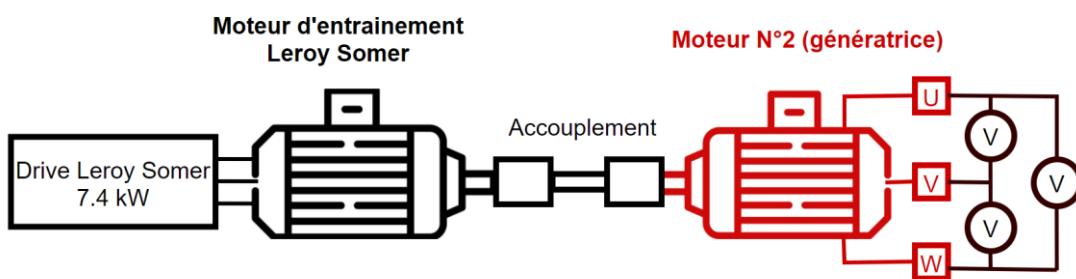


Figure 28 : Schéma de principe de l'essai en génératrice à vide



Résultats

Le Tableau 9 résume les différentes valeurs obtenues lors de l'essai en génératrice à vide pour les différentes vitesses choisies. La tension composée moyenne des trois phases est rapportée à la valeur de phase par un rapport de $\sqrt{3}$ afin de calculer le coefficient K_U .

		Moteur N°2		
Vi-tesse [tr/min]	Vitesse [rad/s]	$U_{i_comp_eff}$ [V]	U_{iph_eff} [V]	K_U moyen [mV _{eff} /rad/s]
500	0	0	0	34.73
1'000	52.36	3.15	1.82	34.84
1'500	104.72	6.32	3.65	34.29
2'500	157.08	9.33	5.39	34.60
3'000	261.80	15.69	9.06	34.18
3'500	314.16	18.6	10.74	33.85
4'000	366.52	21.49	12.41	33.82

Tableau 9 : Valeurs mesurées lors de l'essai en génératrice à vide

Les mesures permettent de tracer les caractéristiques de la tension induite (Figure 29 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). La pente de la droite représente le coefficient de tension induite K_U .

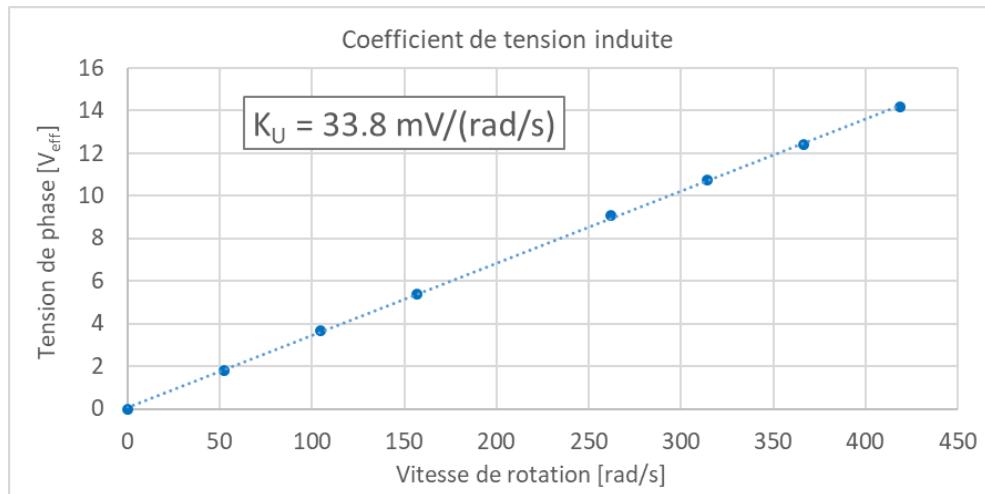


Figure 29 : Caractéristique de la tension induite (moteur N°2)

Pour le moteur N°1, la constante K_U vaut :

$$K_U = 33.8 \text{ [mV}_\text{eff}/(\text{rad/s})]$$

Erreur ! Il
n'y a pas de
texte
répondant à
ce style



**dans ce
document.-1**



L'allure des tensions induites composées à 1'500 tr/min, ainsi que le spectre de la tension sont représentés respectivement à la Figure 30 et à la Figure 31.

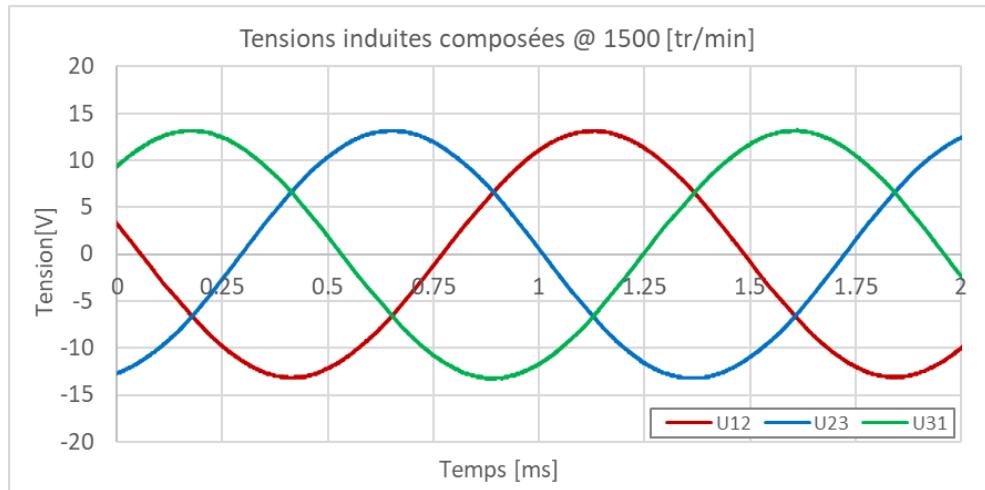


Figure 30 : Allure des tensions induites composées (moteur N°2)

L'allure des tensions induites comporte des harmoniques d'amplitudes nettement plus faibles que dans le cas du moteur N°1. L'absence d'acier au rotor explique ceci. Les harmoniques sont plus faibles que 0.2 % par rapport au fondamental.

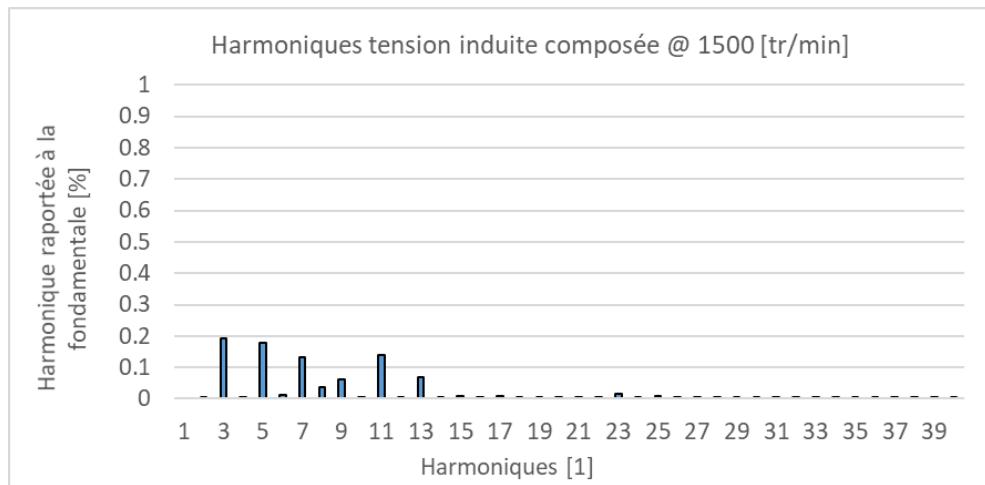


Figure 31 : Spectre de la tension induite composée (moteur N°2)

Toutefois, cette structure en Halbach, avec son rotor en aluminium, réduit considérablement la constante de tension induite, qui passe de 44.5 à 33.8 mV_{eff}/(rad/s). Soit une réduction de 24% environ. La structure d'aimants standard présente l'avantage d'être plus simple à monter, ce qui permet également de réduire les coûts.



2.2.3.2.3. Mesures du moteur en charge

Spécifications

Le test du moteur en charge a pour but de caractériser le moteur avec une charge variable sur l'ensemble de sa zone de travail. Le moteur avec l'électronique de régénération est employé en tant que charge variable.

Conditions de tests

Condition	Valeur	Date
Température ambiante mesurée	21°C	12.09.2021
Humidité relative	Ambiance de laboratoire – B57	
Pression	Ambiance de laboratoire – B57	

Matériel et instruments de tests

Pos.	Instruments	Numéro d'inventaire
1	Pupitre d'alimentation Emerson, 7.5 kW	-
2	Couplemètre Magtrol TMB 311	-
3	Analyseur de puissance N4L-PPA3500	-
4	Sondes de courant IT 405-S ULTRASTAB (phases moteur)	-
5	Sonde de courant Chauvin Arnoux E3N (source DC)	

Description du test

Le moteur est testé pour plusieurs points de 100 [tr/min] jusqu'à sa vitesse maximale possible avec une tension de bus DC de 48 [V]. Et ceci pour des couples mécaniques allant jusqu'au couple maximal atteignable avec un courant de phase de 100 A_{eff}. L'ensemble des grandeurs électriques sont relevées à l'aide de l'analyseur de puissance (Figure 32).

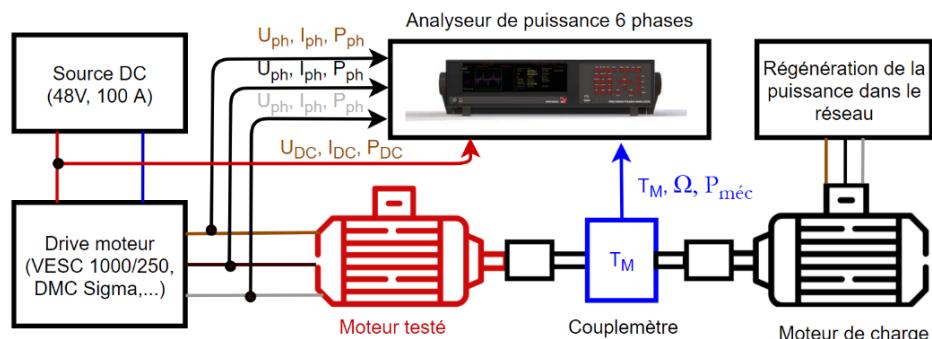


Figure 32 : Schéma de principe de l'essai en moteur



Résultats

La Figure 33 montre le rendement du moteur dans sa zone de travail normale (sans défluxage). Le couple maximal atteignable avec 100 A est de 9 Nm. La vitesse maximale atteignable est d'environ 4250 tr/min et le rendement maximal mesuré atteint 83 %.

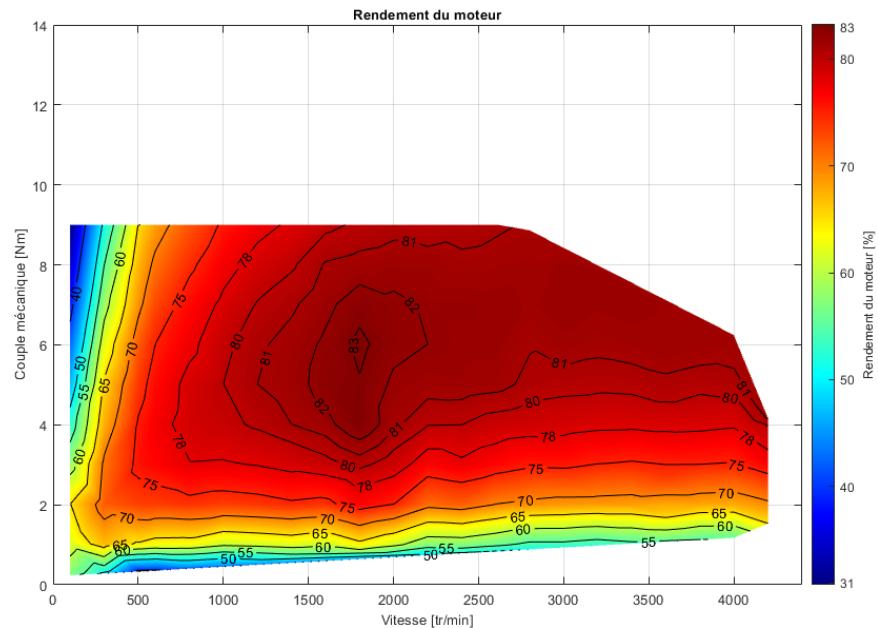


Figure 33 : Rendement en fonction du couple-vitesse (Moteur N°2, $U_{DC} = 48V$, $I_{eff} = 100 A$)

La puissance mécanique maximale fournie par le moteur est d'environ 2500 W (Figure 34 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

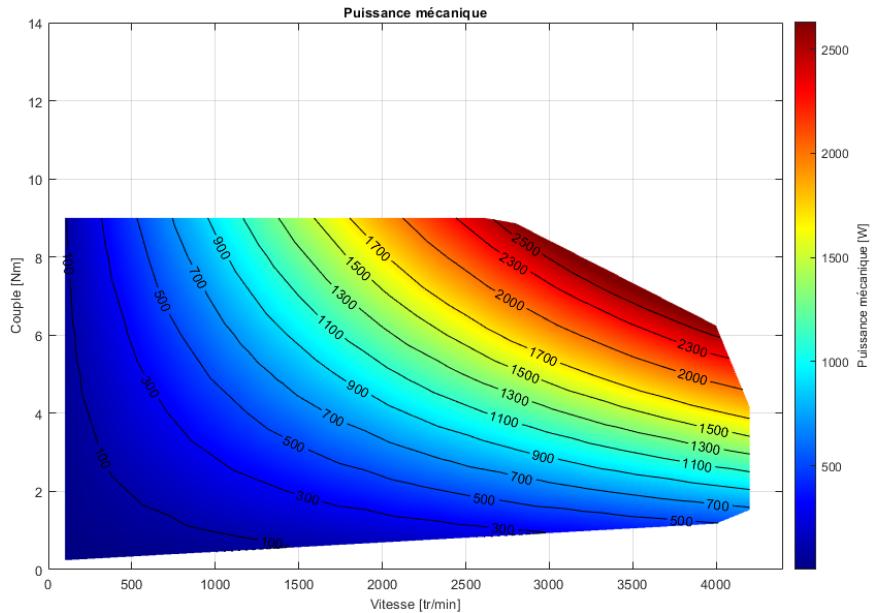


Figure 34 : Puissance mécanique en fonction du couple-vitesse (Moteur N°2, $U_{DC} = 48V$, $I_{eff} = 100 A$)

La caractéristique de couple visible à la Figure 35 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre que le moteur a tendance à saturer pour des courants supérieurs à environ 100 A. La constante de couple ($K_T = 0.097 \text{ Nm/A}$) est déterminée dans la zone linéaire de la caractéristique. Il faut éviter de dépasser des courants de l'ordre de 100 A afin de ne pas surchauffer le moteur. Une température voisine de 95°C a été constatée en surface du moteur après des essais de 2-3 min.

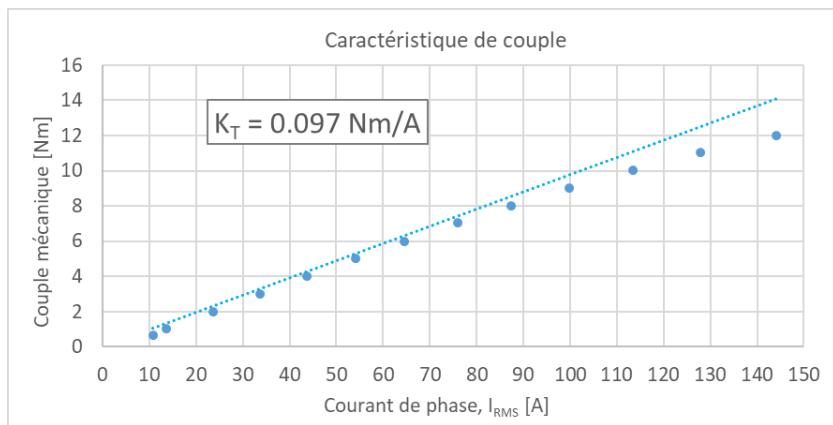


Figure 35 : Constante de couple (Moteur N°2)

La Figure 36 : Allure et FFT du courant de phase dans le moteur N°2 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** montre une allure typique des courants dans les phases du moteur lors des essais. Les harmoniques de rang 5 et 7 présentent une amplitude respective de 1.25 et 0.75 %.

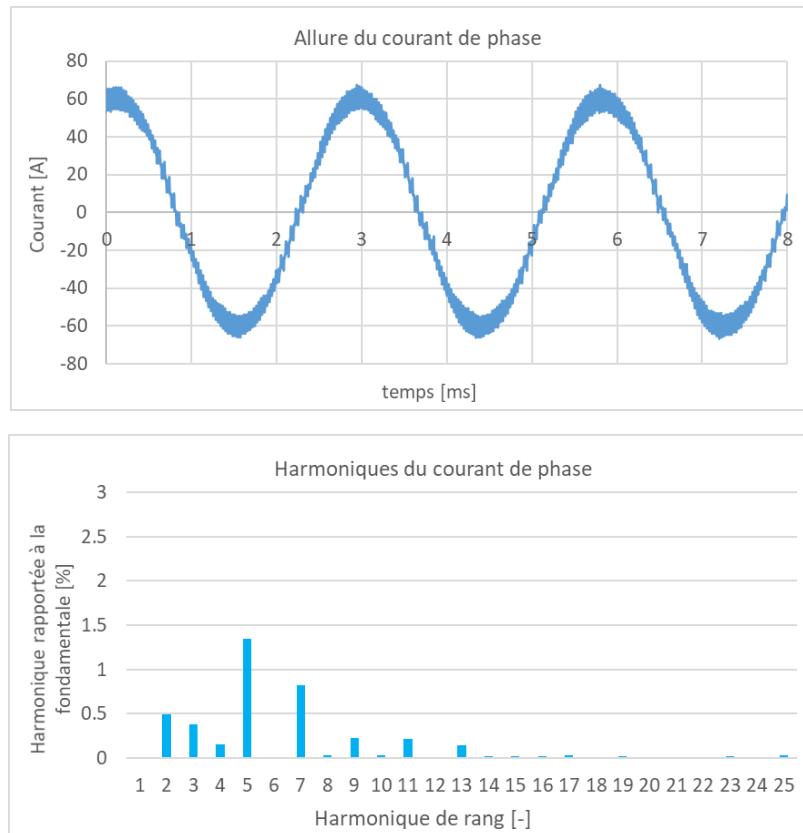


Figure 36 : Allure et FFT du courant de phase dans le moteur N°2

2.2.3.3. Comparaison et discussion des résultats du WP2_T2.2

Le Tableau 10 compare les deux moteurs testés sur le banc d'essais de la HEIG-VD. Ce tableau se complétera au fur et à mesure des variantes développées et testées.

Comparaison des moteurs				
Performances mesurées				
		Moteur N°1	Moteur N°2	Unité
		Aimants rectangulaires	Structure Hal- bach, cage exté- rieur en alumini- num	
K_t	Constante de couple	0.13	0.1	[Nm/A]
K_u	Constante de tension induite	44.5	33.8	[mV/(rad/s)]
K_m	Constante du moteur	1.06	0.79	[Nm/sqrt(W)]
R_{ph}	Résistance de phase @ 20°C	5.02	5.06	[mΩ]
Géométries (Mesurées)				



D_{ext}	Diamètre externe	120	120	[mm]
L_{tot}	Longueur totale	85	85	[mm]
2p	Nombre de pôles	14	14	1
M_{tot}	Masse totale	2.91	2.63	[kg]
Points de fonctionnement spécifiques				
T_{max} @ 100 A	Couple max à 100 Ampères	12	9	[Nm]
η_{max}	Rendement max mesuré	83.7	83.3	[%]
Ω_{max} @ 48V	Vitesse max atteinte	3700	4200	[tr/min]

Tableau 10 : Comparaison des moteurs mesurés

Dans ce cas, le moteur avec un réseau d'aimants de type Halbach n'apporte pas des propriétés intéressantes par rapport au premier moteur. Dans un encombrement identique, le moteur offre un couple environ 34 % inférieur par rapport au moteur avec aimants rectangulaires. Il est possible de monter plus haut en vitesse (en raison de la plus faible constante de tension induite). Toutefois, la zone de travail du moteur est comprise entre 1'000 et 3000 tr/min pour le cycle WLTP. Il n'est donc pas utile d'augmenter la vitesse. De plus, le moteur N°2 a tendance à saturer pour les hauts courants. Actuellement la variante retenue est la première.

2.2.4. Activités réalisés WP2_T2.3:

Cette étape n'était pas initialement prévue mais il a été nécessaire de réaliser des optimisations car en génératrice à vide, le moteur présentait des échauffements excessifs.

Les pertes fer et frottement-ventilation s'élèvent déjà à 400 W pour les deux moteurs FREA à une vitesse de $\Omega = 3000$ tr/min. Pour atteindre l'objectif de 90% de rendement, il faudrait avoir des pertes maximales de 59 W à la même vitesse. Un facteur huit existe entre les pertes des deux exemplaires du moteur FREA et l'objectif.

Notons que les pertes fer sont liées à la fréquence et que cette dernière dépend du nombre de paires de pôles. Le moteur FREA dispose de sept paires de pôles alors que le moteur concurrent possède cinq paires de pôles ($7/5 = 1.4$). Comme les pertes par courants de Foucault sont proportionnelles au carré de la fréquence ($1.42=1.96$) et les pertes par hystérèse sont proportionnelles à la fréquence, un nombre de pôles élevé est défavorable pour les pertes fer.

L'évolution des pertes P_{ffv} mesurées du moteur FREA est décomposée en une courbe de tendance polynomiale du troisième degré. L'équation de la courbe de tendance est de la forme :

$$P_{ffv} = 2.28 \cdot 10^{-9} \cdot \Omega^3 + 2.89 \cdot 10^{-5} \cdot \Omega^2 + 23.16 \cdot 10^{-2} \cdot \Omega$$

Les allures correspondant aux trois termes de l'équation sont indiquées à la Figure 37.

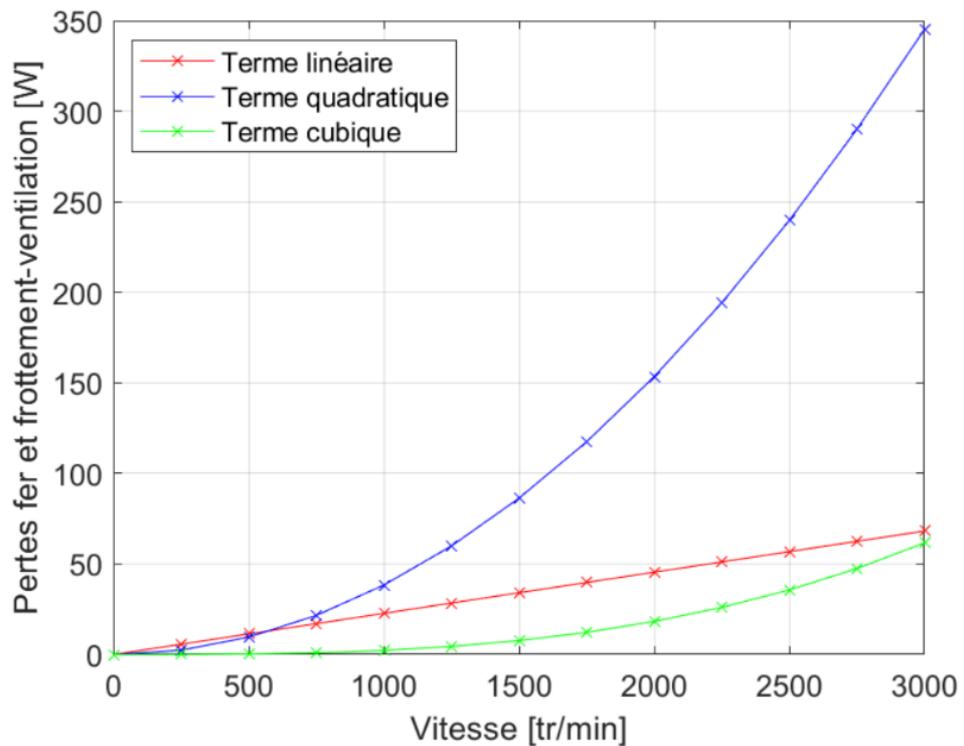


Figure 37 : Décomposition de l'évolution des pertes fer et frottement-ventilation calculées en fonction de la vitesse de rotation du moteur FREA

Le terme quadratique prédomine sur les deux autres termes. Cela signifie que les pertes fer et frottement + ventilation des moteurs FREA proviennent essentiellement des pertes par courants de Foucault ou des frottements visqueux.

Les pertes rotoriques dans les prototypes FREA, dues aux variations de champ, ne sont peut-être pas négligeables ici. Pourtant, la décomposition des aimants rotoriques en plusieurs aimants plus petits est favorable pour réduire ces courants induits dans les aimants et donc les pertes rotoriques.



2.2.4.1. Modifications apportées

Les parties magnétiques ont été éloignées de 5 mm par rapport à la flasque avant du moteur. Ceci permet d'éloigner le roulement à billes du champ tournant et éviter d'induire des courants dans les paliers (Figure 38). Cependant le roulement est toujours en face du bobinage et son diamètre n'a pas été diminué.



Figure 38 : Position des parties magnétiques (stator + rotor)

A l'arrière, un roulement avec un diamètre réduit a été ajouté afin de mieux guider le rotor. Cependant le roulement avec un diamètre plus important a été maintenu (Figure 39 à droite). Maintenant le moteur possède trois roulements à billes à la place de deux.

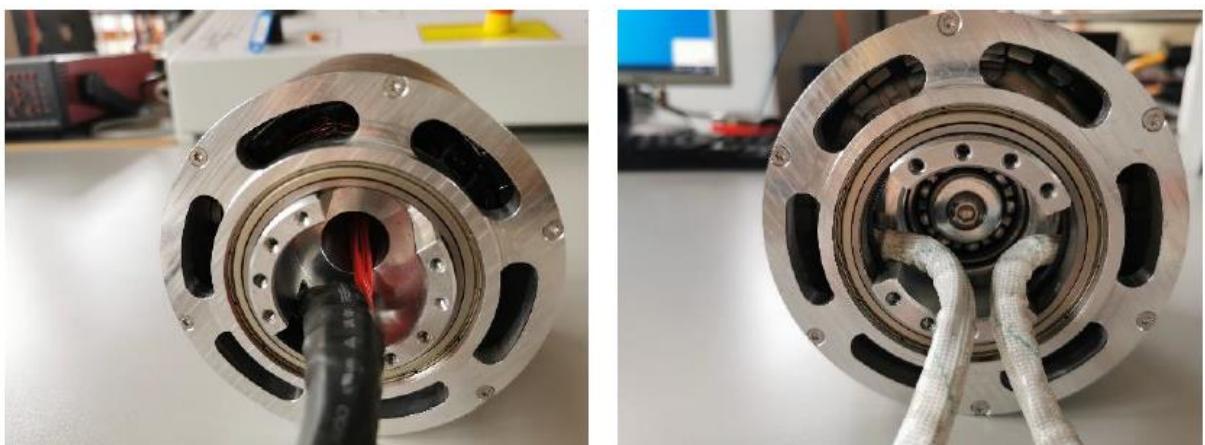


Figure 39 : Position des roulements à l'arrière du moteur

Les premiers stators présentaient des épanouissements des dents d'un angle de 18°. Un élargissement des épanouissements des dents au stator a été proposé (Figure 40). L'élargissement passant à 27°, le bobinage est toujours réalisable par le fournisseur de la société Shematic et cette géométrie permet d'améliorer les performances du moteur.

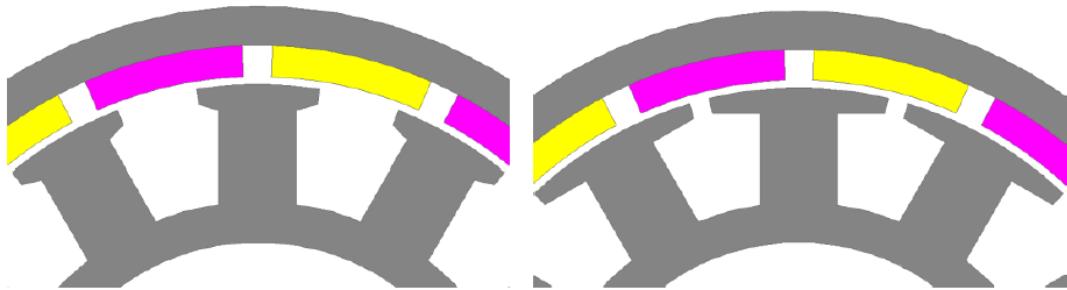


Figure 40 : Vue de l'élargissement des épanouissements des dents au stator (18° à gauche, 27° à droite)

Les pertes dans les aimants sont directement liées à la variation d'induction dans ceux-ci. Comme le montre la Figure 41, la variation de l'induction dans les aimants lors de la rotation est fortement réduite avec un élargissement plus important des dents.

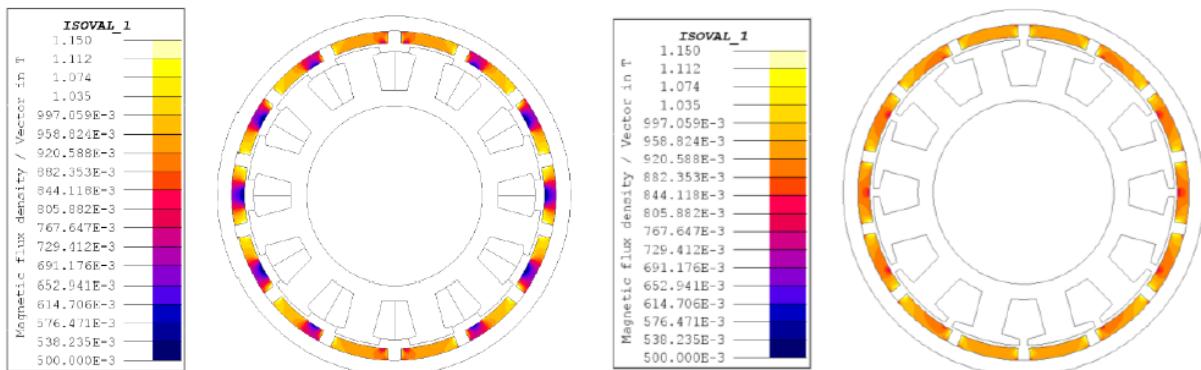


Figure 41 : Induction dans les aimants (18° à gauche, 27° à droite)

Le stator du moteur FREA V5 est identique à celui du moteur FREA V4. Seul le rotor est changé (Figure 42). Le rotor comporte de nouveaux aimants laminés. Le skewing initialement prévu dans les précédentes versions a été ici abandonné.

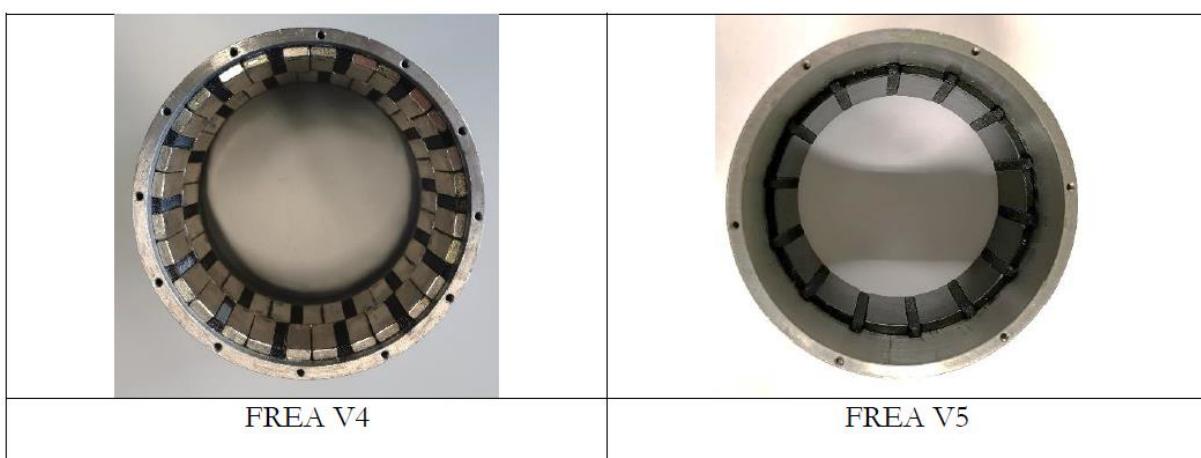


Figure 42 : Nouveau rotor du moteur FREA V5

Les nouveaux aimants laminés que l'on trouve récemment dans des moteurs à haut rendement permettent de réduire les pertes dans le moteur (réduction des pertes générées par les courants induits



circulant dans les aimants). Les aimants ont été commandés à la société « Arnold Magnetics ». Il s'agit d'aimant « L-Type » en NdFeB N45UH. L'aimant de 55 mm de long est découpé en fines lamelles de 2 mm chacune collées entre elles (Figure 43).

Les tests en génératrices à vide permettront de vérifier les allures des tensions induites et de vérifier que cette variante permet de réduire encore les pertes rotoriques. Finalement, un essai en moteur sur l'ensemble de la plage de fonctionnement permettra de vérifier que l'efficacité du moteur est augmentée et ceci sur une plage de fonctionnement un peu plus grande.

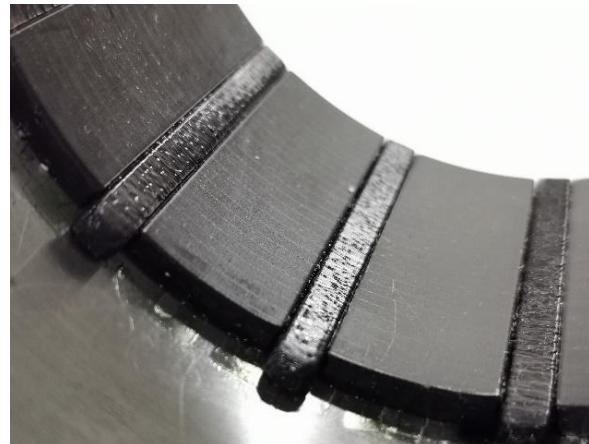


Figure 43 : Nouveau rotor du moteur FREA V5 (vue détaillée des aimants laminés)

2.2.4.2. Mesures sur banc de tests

Pour le moteur Shematic FREA V5, la constante K_U vaut :

$$K_U = 35.3 \text{ [m}V_{eff}/(\text{rad/s})]$$

La structure des aimants sans skewing permet d'augmenter le coefficient K_U d'environ 5 %. Ceci permet d'augmenter la constante du moteur K_m .

L'allure des tensions induites composées à 428 [tr/min], ainsi que le spectre, sont représentés respectivement à la Figure 44 et à la Figure 45.

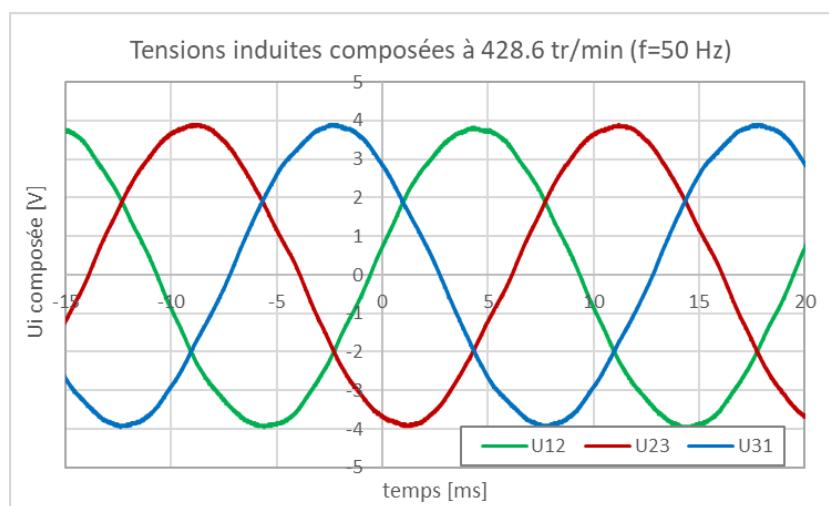


Figure 44 : Allure des tensions induites composées à 428 [tr/min] (FREA V5)



La tension de phase présente des harmoniques relativement faibles. Les harmoniques de rang 3 et 5 représentent environ 1% de la valeur du fondamental. Les harmoniques de rang 7, 9, 11 et 13 sont quant à elles faibles avec environ 0.4 %.

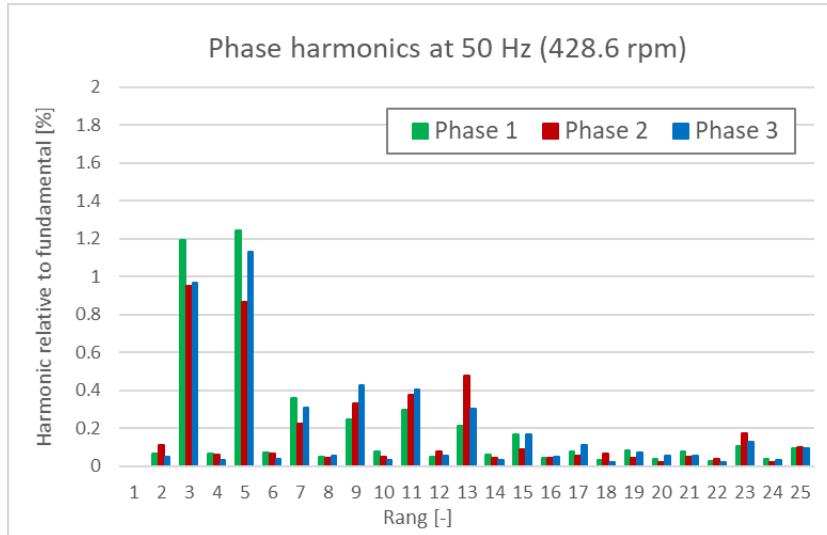


Figure 45 : Spectre de la tension de phase à 428 [tr/min] (FREA V5)

Lors du fonctionnement en génératrice à vide, le prototype FREA est entraîné à vitesse constante par un moteur d'entraînement. La puissance mécanique à l'arbre, nécessaire pour faire tourner le prototype, est relevée à l'aide du couplemètre. Cette puissance est dissipée sous forme de pertes fer+frottement+ventilation et de pertes rotoriques. Les pertes mesurées en génératrice sont réduites de manière significative par rapport à la version N°4 du moteur FREA (Figure 46).

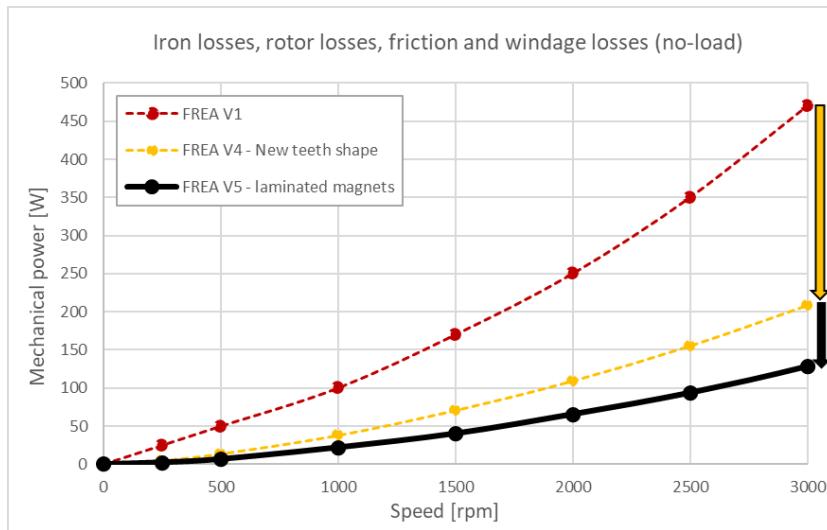


Figure 46 : Pertes frottement et ventilation + pertes fer en fonction de la vitesse de rotation (FREA V5)

Les pertes passent de 210 W à 3000 tr/min à environ 130 W. Cette baisse significative de 80 W est favorable pour le rendement global du moteur. La réduction des pertes est d'autant plus intéressante pour les vitesses élevées.

Les cartographies présentées dans ce paragraphe sont établies sans défluxage. La Figure 47 représente la cartographie du rendement η mesuré dans le plan couple-vitesse.

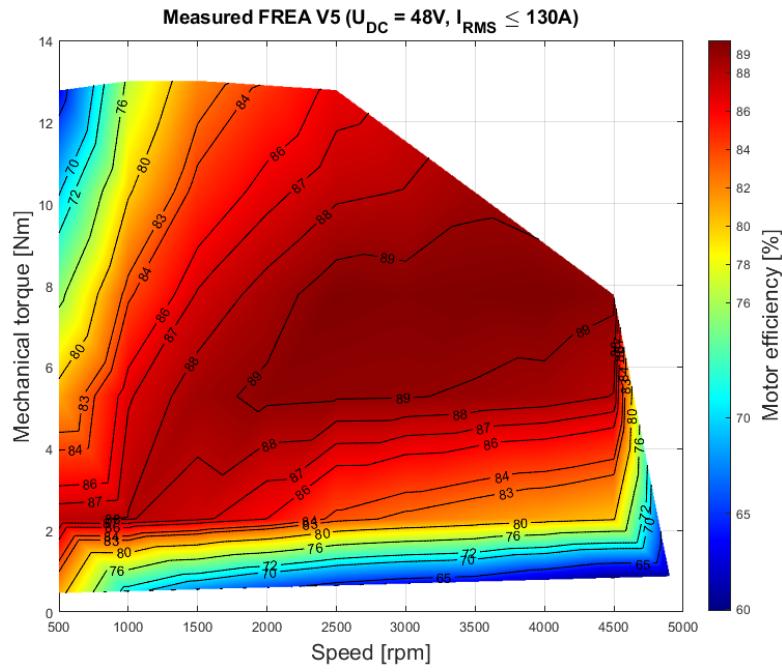


Figure 47 : Cartographie du rendement (FREA V5, $U_{DC} = 48V$, $I_{eff} \leq 130$ A)

Le rendement atteint environ $\eta_{max} = 89.6\%$ à 4905 tr/min à 7.5 Nm. La plage de fonctionnement présentant un bon rendement ($\geq 87\%$) est importante.

La Figure 48 montre que le moteur FREA V5 présente une zone avec de bons rendements (supérieurs à 87%) encore plus importante par rapport au moteur équivalent du marché.

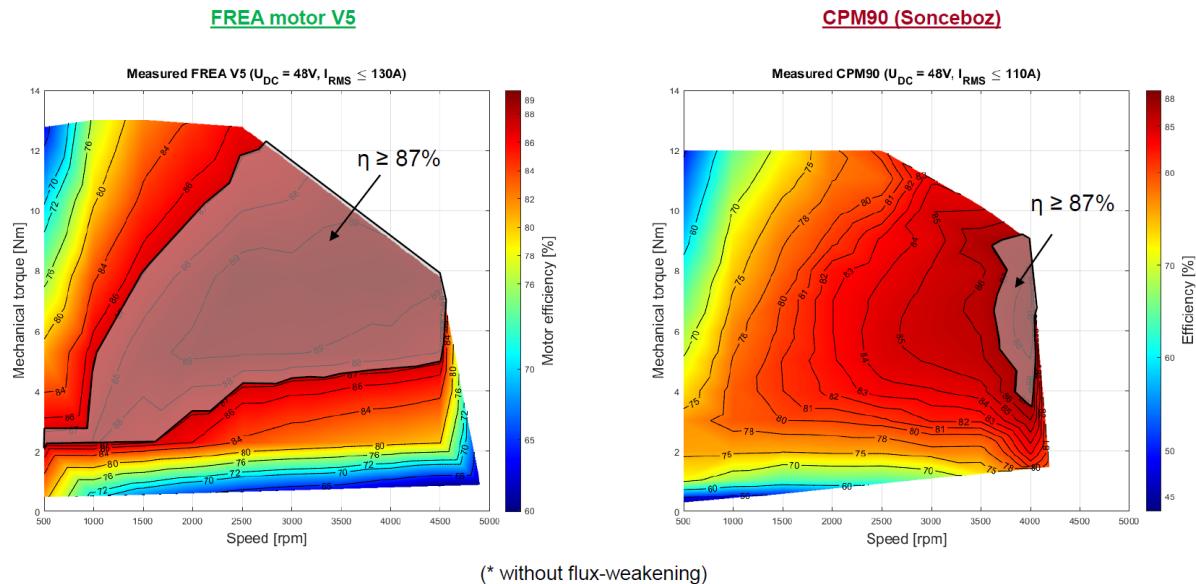


Figure 48 : Comparaison de la plage de rendement supérieur à 87 % entre le moteur FREA V5 et lune référence du marché

La variante V5 du moteur FREA présente, en raison de son bobinage, une vitesse maximale plus élevée que les différents moteurs comparés. En comparaison des autres moteurs, le rendement du moteur FREA V5 est bon et ceci pour une grande plage de fonctionnement. L'utilisation d'aimants laminés a été bénéfique pour augmenter le rendement.



2.3. WP3 : SmartBMS, calculateur d'autonomie en temps réel

Ce WorkPackage sera consacré à l'optimisation et l'implémentation d'un calculateur d'autonomie en temps réel appelé SmartBMS. Le SmartBMS sera notamment capable d'estimer avec précision en temps réel le rayon d'action selon la topographie des parcours. Il utilisera des données géographiques pour visualiser via une interface utilisateur le rayon d'action du VULE. A travers son interface graphique, les bornes de recharge compatibles et les prises secteurs accessibles seront affichées. Le SmartBMS sera équipé d'un module de communication pour transmettre les données du pack batterie vers un serveur afin de pouvoir étudier le profil d'utilisation des VULE.

2.3.1. Activités réalisées WP3_T3.1 : Réalisation du modèle numérique du pack batterie à partir de données expérimentales.

Dans la plupart des batteries avancées, un modèle de la batterie est utilisé en conjonction avec des algorithmes appropriés pour estimer les états internes de la cellule qui ne sont pas directement mesurables, par exemple le SOC (State of Charge). Pour être utilisable lors de la création du logiciel, un modèle numérique de pack batterie a été généré et utilisable comme une librairie. Cette tâche sera sous la responsabilité de Prof. Dr. Vezzini de la BFH Energy Storage Research Centre.

Pour construire ce modèle, il faut que les cellules qui composent le pack batterie de FREA soient caractérisées à différentes températures (-10°C à 50°C) pour une gamme de C-rate (0.1C à 6C). Le but est de connaître la capacité, l'énergie et la puissance des cellules dans différentes conditions de fonctionnement. L'objectif de ce travail sera d'améliorer le modèle de circuit équivalent (ECM) développé à la BFH dans les températures extrêmes afin de réduire l'erreur d'estimation à 5% et à 2% dans les plages d'utilisation standard (5-35°C). Cela signifie une réduction de 50% de l'erreur maximale par rapport à l'état de l'art [11].

2.3.1.1. Réception des cellules

Les cellules lithium-ion sont produites en masse et les spécifications figurant sur leurs fiches techniques peuvent ne pas correspondre parfaitement à la réalité. Dans le cadre de ce projet, les cellules reçues sont des VTC-6 18650 de Sony. La première étape après réception des cellules est de contrôler leur capacité réelle. Pour la calculer, un test de capacité est effectué sur la cellule, qui est déchargée et chargée à plusieurs reprises et à différents taux de charge. À titre indicatif, un C-rate correspond à un courant de même valeur que de sa capacité nominale. Pour une cellule de 3Ah, un C-rate correspond à un courant de 3 ampères. Trois cycles complets seront réalisés à différents courants (0,2, 0,5, 1 et 2 C-rate) pour assurer la qualité du test. Un cycle complet correspond à une décharge constante jusqu'à ce que la cellule atteigne son potentiel minimum (2.5V), suivie d'une période d'inactivité de 30 minutes pour laisser la cellule se stabiliser. Ensuite, une charge CCCV (Courant Constant Voltage Constant) est effectuée c'est-à-dire à courant constant jusqu'à ce que le potentiel maximal soit atteint, puis à tension constante jusqu'à ce que le courant soit inférieur à 0,03C-rate. De cette manière, la cellule est assurée d'être chargée à sa pleine capacité. La figure ci-dessous montre le résultat de ce test et l'influence du taux C.

Le résultat du test montre qu'un taux de 1 C-rate, la capacité de la cellule correspond à sa fiche technique, soit 3000mAh (Figure 49). Cependant, à un C-rate inférieur, celle-ci augmente, ce qui est courant pour une NMC. L'inverse est aussi observable pour un C-rate supérieur. Les différences sont de l'ordre de 2% de la capacité, dans des conditions spécifiques où la cellule est chargée en permanence à courant constant. À la suite de ce test, la capacité mesurée correspond à la valeur définie dans le datasheet. L'influence du courant sur celle-ci est négligeable, mais il est important de savoir que le SOC peut être supérieur à 100%. Maintenant que la capacité réelle de la cellule est connue, l'étape suivante consiste à analyser le potentiel électrochimique en fonction de l'état de charge de la cellule.

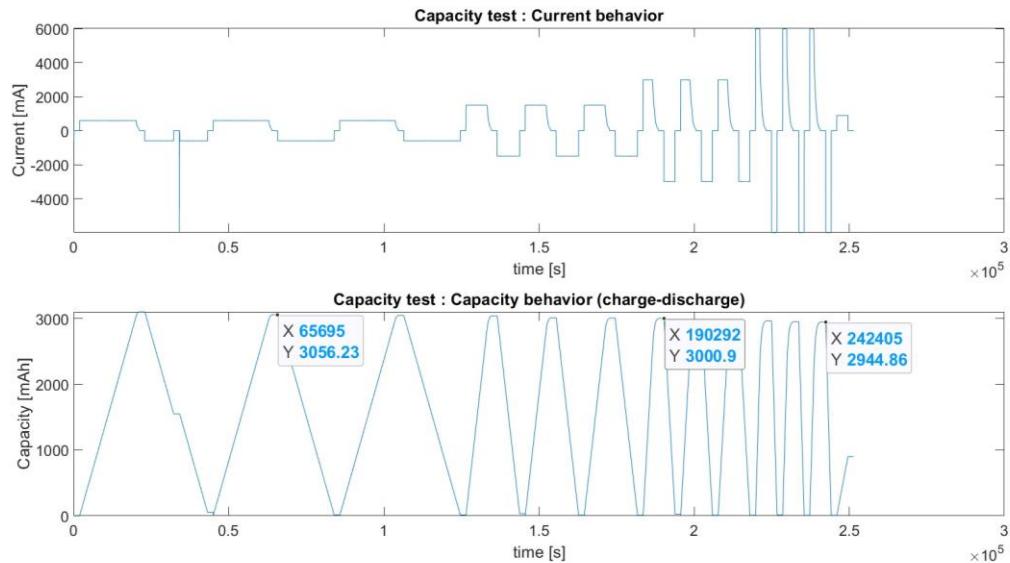


Figure 49 : test de capacité

2.3.1.2. Comportement de la tension

Le fonctionnement des cellules est basé sur le potentiel électrochimique entre les deux électrodes. Il diminue au fur et à mesure que les ions de lithium convergent de l'anode vers la cathode. Dans un cas idéal, le potentiel mesuré aux bornes de la cellule correspond au potentiel électrochimique. Cependant, lorsqu'un courant traverse la batterie, il y a des pertes dues à la résistance interne et aux effets de polarisation de la concentration et de l'activation. Du point de vue d'un circuit électrique, ce potentiel, également appelé tension en circuit ouvert OCV, est représenté par la source de tension, et les pertes par des résistances et des condensateurs. Cette représentation est appelée ECM, et il existe une multitude de possibilités de circuits. Mais les modèles les plus répandus et précis sont la double polarisation et sa version étendue, le modèle Enhanced self-correcting, ESC. Dans ce document, seul le modèle ESC sera pris en compte étant donné que c'est celui ayant obtenu les meilleurs résultats.

2.3.1.3. Enhanced self-correcting modèle

Le modèle ESC est une amélioration du modèle à double polarisation, où l'effet d'hystérésis est représenté indépendamment de l'OCV. En outre, il est composé d'une résistance et de deux éléments RC pour les pertes internes et les effets dynamiques, comme le montre la Figure 50.

Tous les paramètres de ce modèle dépendent de la valeur prédictive du SOC, de sorte que la qualité de la valeur estimée de la tension dépend de sa précision. La première étape du calcul de la table de correspondance de ces éléments en fonction du SOC concerne le comportement de l'OCV.

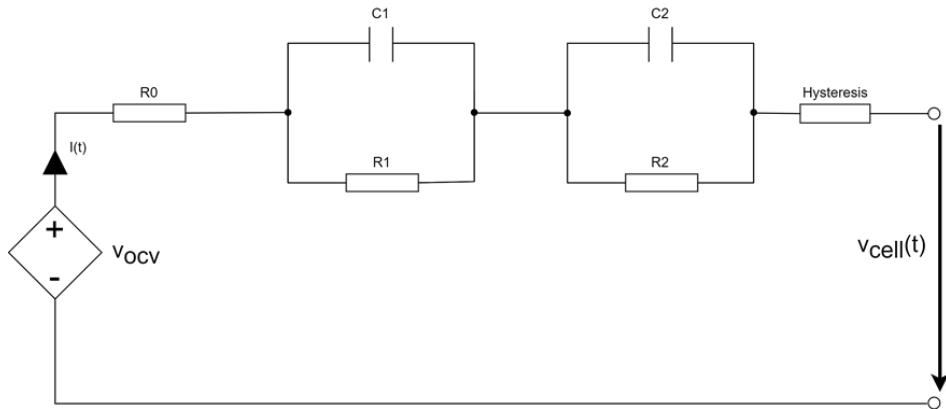


Figure 50 : Enhanced self- correcting modèle

2.3.1.4. Comportement de l'OCV

L'OCV représente le potentiel électrochimique de la cellule. Sa valeur diminue en même temps que le SOC, mais de manière non linéaire. Il est donc important d'établir une valeur précise pour chaque pourcentage de la capacité de la cellule. Pour cela, la mesure de l'OCV doit être réalisé avec un courant très faible (0,03 C-rate), de sorte que les pertes sont si faibles qu'elles peuvent être négligées. Ainsi, il est possible de faire l'hypothèse que la mesure de la tension sur la cellule correspond à la courbe OCV, comme une cellule idéale (Figure 51). Le résultat de ce test est affiché sur le graphique suivant, où l'OCV est exprimé en fonction du SOC.

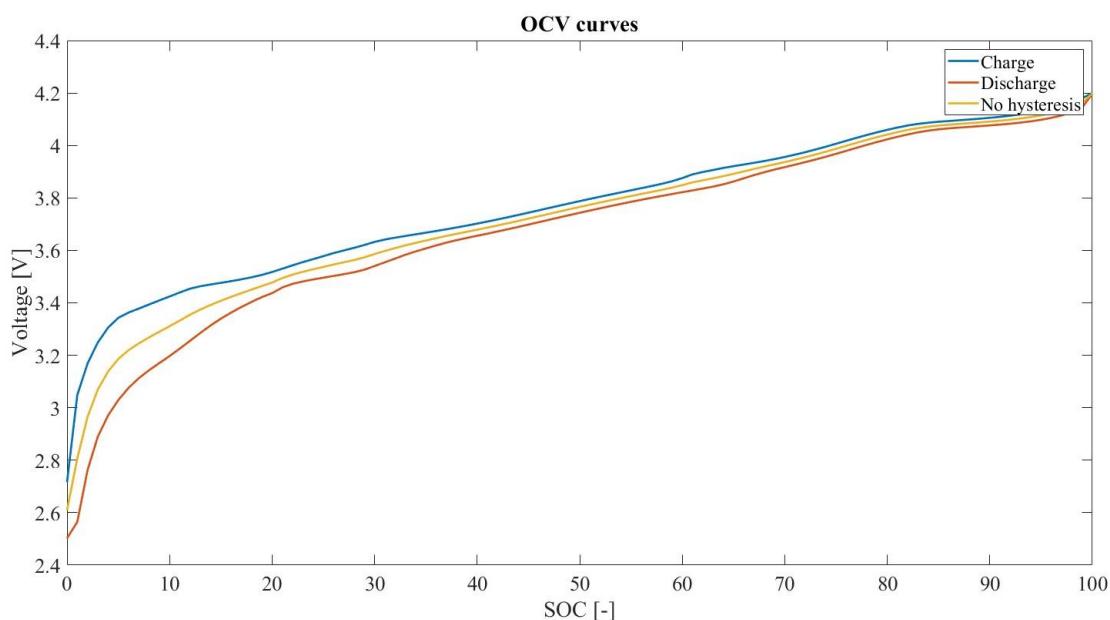


Figure 51 : La courbe de l'OCV d'une cellule NMC

Le test OCV montre que la cellule est soumise à un effet d'hystérésis important. Avec le modèle ESC, il est nécessaire d'isoler la courbe OCV pour obtenir une courbe unique sans effet d'hystérésis. Celle-ci est calculée en prenant la valeur moyenne entre les deux courbes pour chaque point.



$$OCV_{withoutHysteresis} = \frac{OCV_{charge} + OCV_{discharge}}{2}$$

Ensuite, la courbe OCV peut être enregistrée dans une table de correspondance avec une valeur de tension liée à un pourcentage spécifique du SOC, allant de 0 à 100%. Puis en soustrayant la courbe de l'OCV de celle de la charge et de la décharge, le potentiel dû à l'effet d'hystérésis peut être isolé lui aussi (Figure 52).

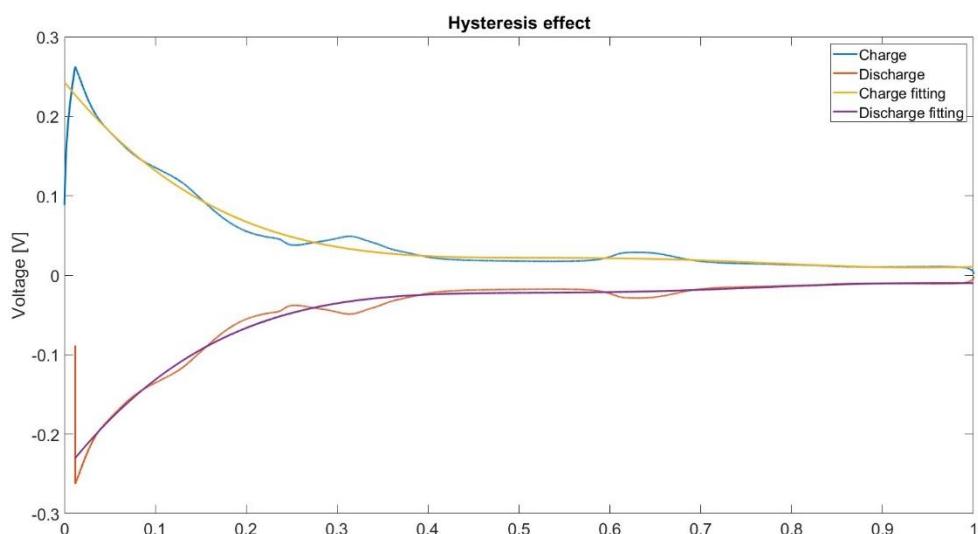


Figure 52 : Hysteresis potential effect (fitted)

2.3.1.5. Potentiel dû à l'effet d'hystérésis

L'élément d'hystérésis sur l'ESC (Figure 50) doit prendre en compte cette influence en fonction du SOC et du signe du courant. En effet, étant donné que la courbe OCV est la moyenne entre la charge et la décharge, l'hystérésis est de même valeur, mais de signe différent en fonction de ce dernier. De ce fait, la valeur absolue du potentiel pour être enregistré de la même manière que la courbe OCV, c'est-à-dire dans une table de correspondance avec une valeur de tension liée à un pourcentage spécifique du SOC. Enfin, il sera nécessaire de multiplier sa valeur par le signe du courant pour calculer le voltage de la cellule.

2.3.1.6. Estimations des résistances et des constantes de temps

Les estimations de la résistance interne et des deux éléments RC constituent la partie la plus complexe du calcul de l'ECM. Ces trois éléments représentent la variation de la tension de la cellule lorsqu'un courant la traverse. Pour la résistance interne, la tension change instantanément, mais pour les éléments RC qui simulent les effets dynamiques, leur influence est dépendante du temps. Le potentiel de polarisation d'activation se stabilise sous la seconde, mais pour l'effet de polarisation de concentration, il faut compter plusieurs secondes. Pour visualiser et calculer leur impact sur la tension de la cellule, une impulsion de courant est appliquée à la cellule pendant vingt secondes, comme le montre la Figure 53 ci-dessous :

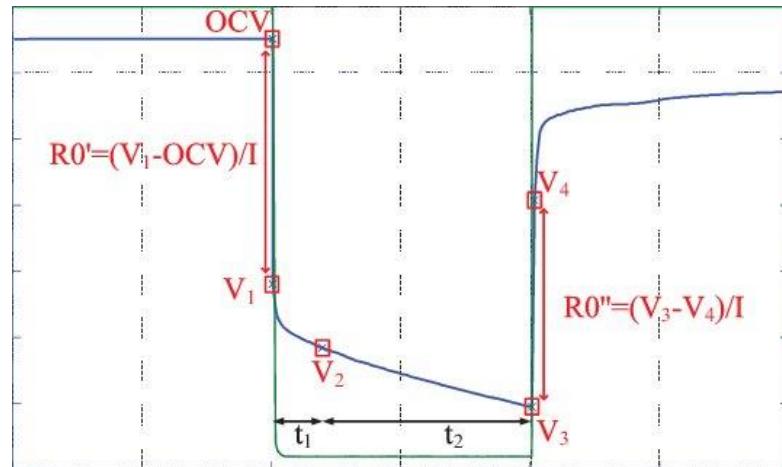


Figure 53 : Comportement du voltage à la suite d'une pulse de courant

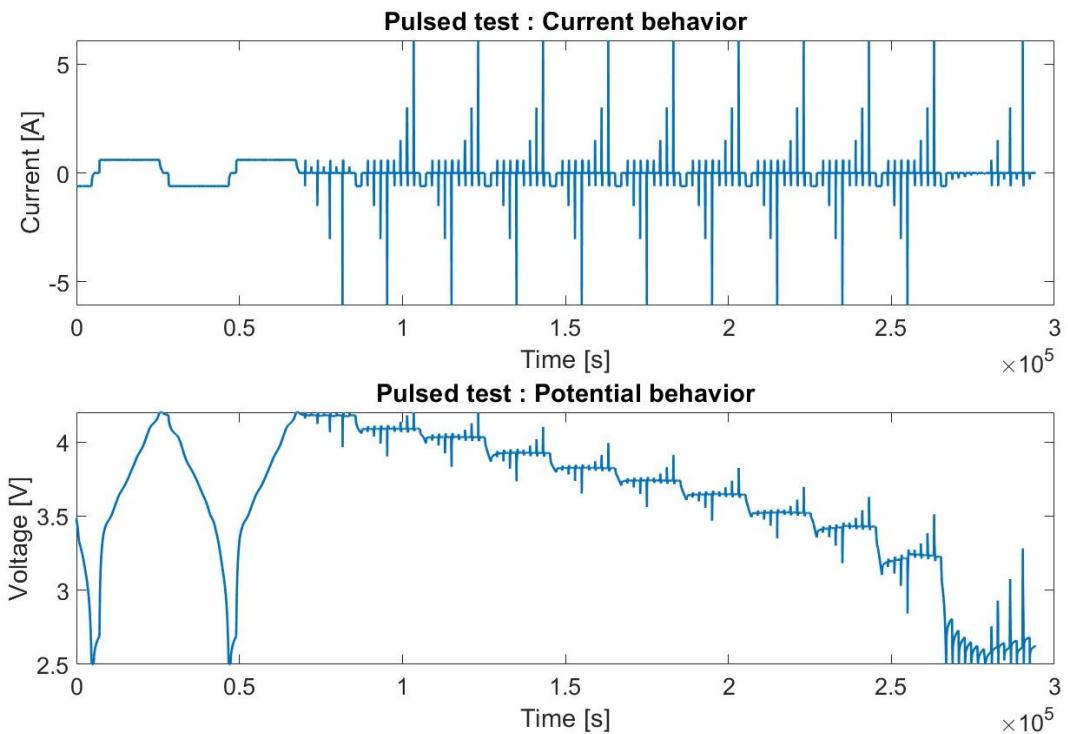


Figure 54 : Test à pulsation effectué sur la cellule NMC VTC-6

Cette impulsion est effectuée à plusieurs reprises à différents C-rate et à différents SOC pour observer leur sensibilité et ainsi obtenir une table de référence couvrant l'entièreté du SOC (Figure 54). Pour extraire la valeur de la résistance interne et des éléments RC, il est nécessaire d'abord d'isoler chaque pulse. Ensuite, le potentiel d'hystérésis doit être déduit pour analyser uniquement leur influence sur la variation du potentiel de la cellule. Le testeur du laboratoire fournit des mesures précises permettant de connaître la valeur exacte du SOC pendant le test, ce qui permet de calculer $V_{hysteresis}(SOC)$ sans problème. Ensuite, la première étape est de calculer la variation instantanée de la tension due à résistance interne.

Sur la base de littératures [10];[11], la résistance interne d'une cellule NMC ne doit pas dépasser quelques $m\Omega$. Elle provoque une chute de tension qui réagit instantanément au changement de courant. Cela permet d'estimer sa valeur facilement avec l'équation ci-dessous.



$$R_0 = \frac{V_{OCV} - V_1}{I}$$

Maintenant que la résistance interne est calculée, les éléments RC peuvent être estimés en isolant la courbe de tension entre V1 et V3. De cette manière, l'influence due aux effets de polarisations est estimée mathématiquement via l'équation du potentiel de deux éléments RC.

$$U_{RC} = I(t) * (R_{RC1} * e^{-\Delta t / \tau_{RC1}} + R_{RC2} * e^{-\Delta t / \tau_{RC2}})$$

En exploitant les valeurs de chaque composant, l'équation U_{RC} devrait être en mesure de reproduire avec précision la courbe de tension entre V1 et V3. Pour parvenir à cette simulation, le logiciel MATLAB est employé en raison de sa librairie intégrée qui permet une modélisation mathématique précise des courbes. Cette approche facilite l'analyse de chaque impulsion, permettant ainsi la détermination précise de leurs valeurs respectives. Le processus implique plusieurs étapes cruciales.

En premier lieu, il est essentiel de formuler l'équation mathématique de manière à éviter toute division, comme illustré dans l'équation **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, afin de garantir une représentation adéquate.

$$U_{RC} = I(t) * (a * e^{-\Delta t * \alpha} + b * e^{-\Delta t * \beta})$$

Ensuite, il est nécessaire de fixer des limites pour chaque variable. En effet, sans cela, il existe une infinité de possibilités. Tout doit être défini dans un élément « **fitype** » pour pouvoir ensuite être utilisé par la fonction « **fit** » pour estimer la valeur de chaque paramètre. Les limites doivent être fixées avant d'ajuster la courbe. Pour choisir leur valeur, la fonction **trials & errors** peut être utilisée, mais cela prendra trop de temps pour obtenir de bons résultats. Pour éviter ça, une spectroscopie d'impédance électro-chimique est effectuée sur la cellule. C'est une méthode permettant d'évaluer la performance électro-chimique d'une batterie. Elle consiste à appliquer un signal alternatif de faible amplitude à différentes fréquences à la cellule et à mesurer la réponse en termes d'impédances. Ces dernières permettent ensuite de déterminer avec précision la valeur de chaque paramètre ECM pour une valeur du SOC spécifique. Son inconvénient est que les mesures sont effectuées à des fréquences très basses et très hautes, ce qui le rend très sensible à toutes perturbations. Sachant que chaque essai dure plus d'une heure, l'utilisation de cette seule méthode pour calculer l'ECM prendrait trop de temps. Cependant, si elle est effectuée à certaines valeurs de SOC (chaque 20%), les valeurs obtenues peuvent être utilisées pour établir les limites de la fonction « **func** » (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

Une fois que les limites sont fixées, la fonction d'ajustement peut être appliquée pour estimer la résistance et la constante de temps pour les deux éléments RC via les paramètres calculés de l'équation.

- $R_1 = a$
- $R_2 = b$
- $\tau_1 = \frac{1}{\alpha}$
- $\tau_2 = \frac{1}{\beta}$
- $x = \Delta t$

Ainsi, la tension de la cellule peut être calculée en fonction du courant et du SOC avec l'équation ci-dessous.

$$V_{cell}(soc) = V_{OCV}(soc) - R_0(soc) * I - R_1(soc) * I_{R_1} - R_2(soc) * I_{R_2} + V_{hysteresis}(I, soc)$$

Par sa sensibilité à la valeur SOC, l'approximation du potentiel aux bornes de la cellule permet de garantir l'exactitude de l'estimation du SOC à partir de l'intégration actuelle. Plus l'erreur d'estimation de la tension est grande, plus l'estimation du SOC est erronée. Néanmoins, la complexité pour corriger sa valeur est que le rapport entre le SOC et la tension est fortement non linéaire. Pour pouvoir la réaliser, il est nécessaire de coupler l'ECM à un EKF.



2.3.1.7. Filtre étendu de Kalman

Le filtre de Kalman étendu est un algorithme utilisé pour estimer l'état d'un système à partir de mesures bruyantes et indirectes. Il s'agit de l'extension du filtre de Kalman, qui est optimal pour les systèmes linéaires. Les batteries NMC étant non linéaires, la version étendue est plus adaptée. L'EKF utilise une linéarisation locale du système non linéaire pour produire un modèle linéaire approximatif qui peut être utilisé par l'algorithme standard du filtre de Kalman. Cette linéarisation locale permet à l'EKF d'obtenir de bonnes estimations de l'état du système, même en présence de non-linéarités. La Figure 55 résume grossièrement ce processus.

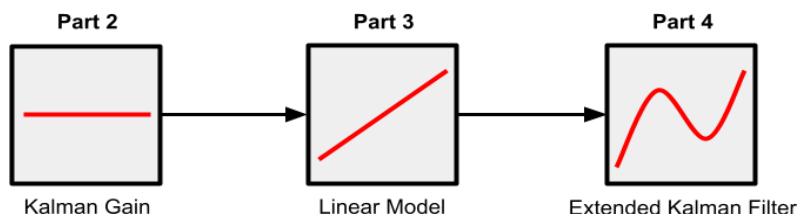


Figure 55 : L'approche de l'EKF

L'EKF est un processus en deux étapes. Tout d'abord, le filtre prédit l'état du système au prochain pas de temps en utilisant les états actuels estimés et le modèle du système. Ensuite, le filtre met à jour les états estimés en utilisant la sortie mesurée du système et l'état prédit pour corriger la valeur du SOC au pas suivant.

2.3.1.8. Prévoir les états futurs

Cette étape a pour but de prédire la valeur du SOC et la tension de chaque élément RC pour le pas de temps suivant. L'équation de prédiction est la suivante :

$$\widehat{x}_{k+1} = \widehat{A}_k * \widehat{x}_k + \widehat{B}_k * I$$

Où \widehat{A}_k est la matrice Jacobienne des dérivées partielles de l'ECM sans l'hystérosis. Par conséquent, ils dépendent des constantes de temps de chaque élément RC.

$$\widehat{A}_k = \begin{pmatrix} e^{-\frac{\Delta t}{\tau_1}} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta t}{\tau_2}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Δt : sampling time, 1sec

La matrice d'entrées \widehat{B}_k représente le décalage du modèle.

$$\widehat{B}_k = \begin{pmatrix} R_1 * \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_1}}\right) \\ R_2 * \left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_2}}\right) \\ \eta * \frac{\Delta t}{3600 * Q} \end{pmatrix}$$



Les deux premières lignes concernent la linéarisation des résistances de chaque élément RC. La troisième ligne multipliée par le courant donne la capacité dépensée ou gagnée. Le résultat donne les valeurs estimées du potentiel de chaque élément RC et le SOC pour le pas de temps suivant.

$$\widehat{\vec{x}_{k+1}} = \begin{pmatrix} V_{RC1,k+1} \\ V_{RC2,k+1} \\ SOC_{k+1} \end{pmatrix}$$

Le vecteur $\widehat{\vec{x}_k}$ est le résultat de l'estimation précédente, qui a été corrigée par la comparaison entre l'estimation et la mesure à la fin de ce chapitre. Maintenant, la tension de chaque partie de l'ECM est connue. Cela signifie que la tension de la cellule peut être calculée, comme ci-dessous :

$$V_{cell}(SOC_{k+1}) = V_{OCV}(SOC_{k+1}) - R_0(SOC_{k+1}) * I - \widehat{x}_{k+1}(1) - \widehat{x}_{k+1}(2) + V_{hysteresis}(SOC_{k+1})$$

À ce stade, le potentiel pour le pas de temps suivant est connu et la première partie de l'EKF est terminée.

2.3.1.9. Mise à jour des états d'estimation

L'objectif de cette partie est de comparer la mesure et l'estimation pour mettre à jour la première pré-diction faite dans la première étape. Néanmoins, avant la comparaison, il est nécessaire de prendre en compte le bruit, l'incertitude du capteur et la pré-diction précédente.

- Incertitude de $\widehat{\vec{x}_k}$: $\Sigma_X = \begin{pmatrix} 1e^{-6} & 0 & 0 \\ 0 & 1e^{-8} & 0 \\ 0 & 0 & 2e^{-4} \end{pmatrix}$
- Incertitude du capteur de tension : $\Sigma_V = 2e^{-2}$
- Incertitude du capteur de courant : $\Sigma_W = 2e^{-2}$

Σ_X est la matrice d'erreur qui permet de corriger l'incertitude de la pré-diction précédente et des paramètres de l'ECM. Ses valeurs ci-dessus ne concernent que la première boucle, lorsque le système de gestion de la batterie (BMS) est activé. Ensuite, à chaque échantillonnage, elle sera affinée pas à pas en fonction de Σ_V , Σ_W , \hat{A}_k et \hat{B}_k avec l'équation suivante :

$$\Sigma_X = \hat{A}_k * \Sigma_X * \hat{A}'_k + \hat{B}_k * \Sigma_W * \hat{B}'_k$$

Dans ce projet, Σ_V et Σ_W ont la même valeur. La raison en est que l'algorithme a été réalisé en laboratoire avec un capteur de haute précision. En général, leurs valeurs sont différentes et dépend de leur erreur absolue indiqué dans leur datasheet. L'étape suivante consiste à considérer la sensibilité de l'estimation de la tension. Le vecteur qui représente cette incertitude est appelé Σ_Y et est calculé comme suit :

$$\Sigma_Y = \hat{C}_k * \Sigma_X * \hat{C}'_k + \hat{D}_k * \Sigma_V * \hat{D}'_k$$

La raison pour laquelle Σ_X figure dans cette équation est que la tension d'estimation dépend également du capteur de courant. La sensibilité de Σ_X et Σ_V sont déterminées par les matrices \hat{C}_k and \hat{D}_k respectivement. La première est la dérivée partielle de la tension en fonction du vecteur $\widehat{\vec{x}_k}$, ce qui donne le résultat suivant :

$$\hat{C}_k = \left(\frac{\partial V}{\partial x} \middle| x = \widehat{\vec{x}_k} \right) = \begin{pmatrix} -1 \\ -1 \\ \frac{dOCV}{dSOC} \end{pmatrix}$$



La matrice \hat{D}_k est unitaire, elle est représentée par la résistance interne R_0 . Une analyse de sensibilité explique l'importance de ce choix. En résumé, R_0 à l'influence la plus importante sur la prédiction du SOC.

$$\hat{D}_k = R_0$$

Ainsi, les deux matrices, Σ_X et Σ_Y , sont utilisées pour calculer le vecteur de sensibilité à l'erreur de tension L. Elle contient la sensibilité de chaque élément de \hat{x}_k et sera multiplié par l'erreur entre la tension estimée et mesurée pour corriger la prédiction du SOC.

$$L = \frac{\Sigma_X * \hat{C}'_k}{\Sigma_Y}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k + L * (V_{meas} - V_{cell})$$

La dernière étape est d'actualiser la matrice d'incertitude Σ_X via la matrice L et le vecteur Σ_Y représentant la sensibilité de la tension.

$$\Sigma_X = \Sigma_X - L * \Sigma_Y * L'$$

De cette manière, la matrice d'incertitude est, elle aussi, affinée afin d'augmenter la précision de l'algorithme pas à pas.



2.3.1.10. Résultats en Laboratoire

La validation de l'algorithme est réalisée avec un test WLTP qui permet de simuler un comportement type d'un véhicule électrique léger en circulation (cf. [4]). Durant l'expérience, chaque seconde, une nouvelle mesure est effectuée où la tension, le courant, la température et la capacité chargée et déchargée sont enregistrées. Grâce à la précision des mesures, le profil du SOC peut facilement être calculé et pourra servir de référence avec celui estimé par l'algorithme. Pour ce dernier, les informations requises pour son fonctionnement sont le courant, le voltage, la température et l'état initial de la cellule (cf. Figure 56).

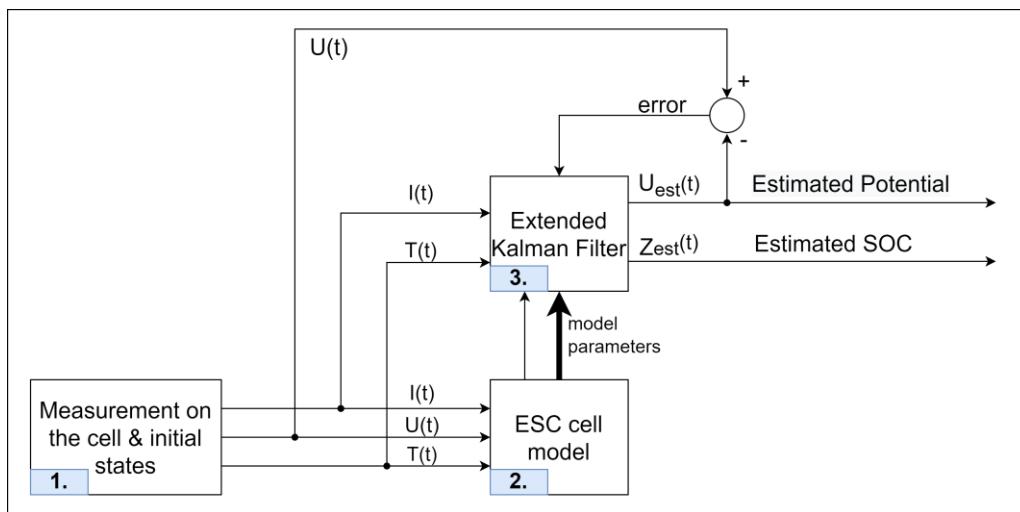


Figure 56 : Vue générale du fonctionnement de l'algorithme

L'objectif du développement de l'ECM couplé avec un EKF est de réduire l'erreur d'estimation du SOC à moins de 2% dans une zone de température standard (5°C-35°C). Pour des températures en dehors de ce spectre, l'erreur doit être moins de 5%. Afin de valider ces critères, l'algorithme doit estimer le SOC d'un test WLTP à quatre différentes températures (0°C, 10°C, 25°C, 45°C). Ainsi, deux sont considérées comme des températures extrêmes (Figure 57 et Figure 58) et deux autres sont dans la zone d'opération (Figure 59 et Figure 60).

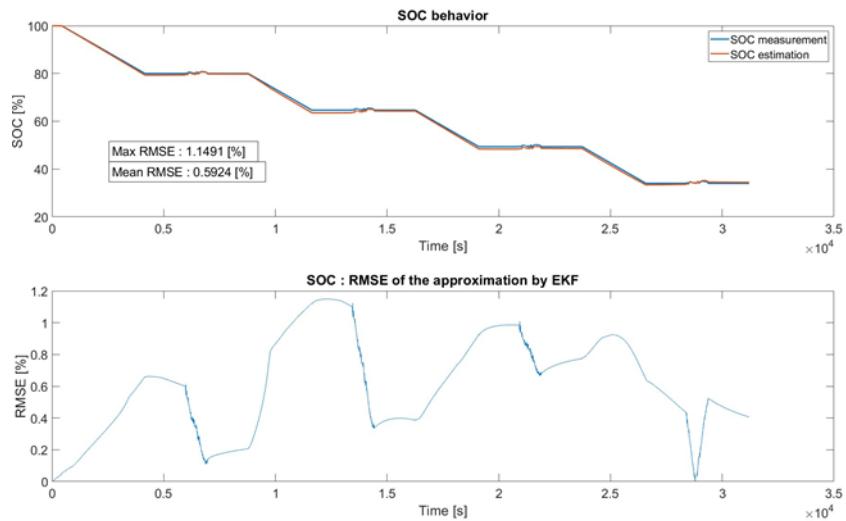


Figure 57 : Estimation du SOC via un profil WLTP à différentes valeurs de SOC à 25°C

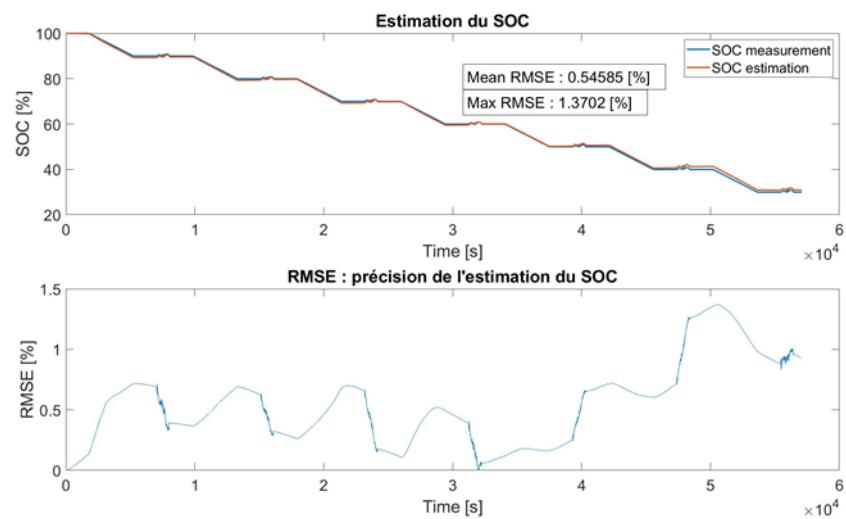


Figure 58 : Estimation du SOC via un profil WLTP à différentes valeurs de SOC à 10°C

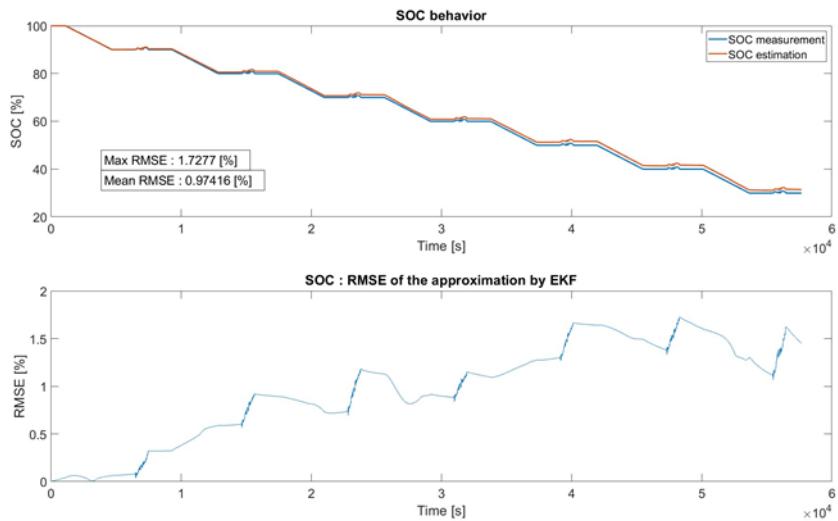


Figure 59 : Estimation du SOC via un profil WLTP à différentes valeurs de SOC à 45°C

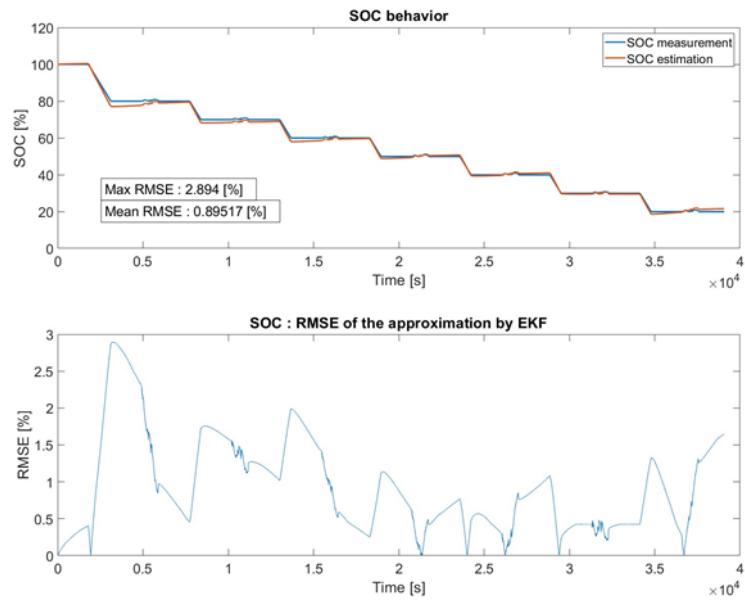


Figure 60 : Estimation du SOC via un profil WLTP à différentes valeurs de SOC à 0°C

Les résultats des quatre différents tests WLTP montrent que l'algorithme est bien conforme aux exigences du projet.



2.3.1.11. Conversion de l'algorithme en langage C

L'ECM et l'EKF ont été réalisés sur MATLAB pour permettre une analyse aisée des résultats et faciliter leur amélioration. Toutefois, pour implémenter l'algorithme dans un BMS, il est nécessaire de le convertir en langage C. La Figure 61 offre une vue d'ensemble du fonctionnement de l'algorithme en code C.

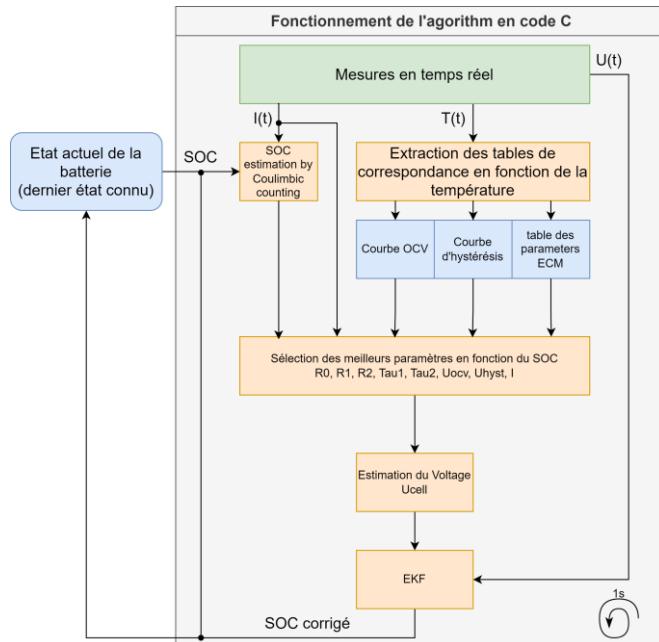


Figure 61 : Vue générale du fonctionnement de l'algorithme en C

Au démarrage du BMS, la dernière valeur estimée du SOC est récupérée et les mesures de tension, de courant et de température sont prises. Ces données permettent de déterminer quelles tables de référence doivent être analysées. Ensuite, une première estimation du SOC est réalisée via la méthode du comptage coulombien en se basant sur sa précédente valeur. Basé sur cette estimation, les valeurs de l'ECM correspondant le mieux sont extraites des tables sélectionnées pour estimer le voltage de la cellule. Enfin, à travers l'EKF, la valeur du SOC va être corrigée en fonction de l'erreur de l'estimation de la tension. Ce processus est répété chaque seconde, mais pour éviter de consommer inutilement des ressources, les tables de référence ne sont pas actualisées tant que la température n'a pas changé de manière significative ($\pm 5^\circ\text{C}$).

Résultats du WP3_T3.1

Étant donné que l'algorithme est conçu majoritairement d'équation mathématique, sa conversion en langage C n'a nécessité que peu de modifications. Cependant, deux tâches ont requis plus de ressources. Tout d'abord, le code C rend complexe la communication entre les différentes valeurs au sein des fonctions. Afin de remédier à cela, la structure de l'algorithme a été revue pour faciliter la communication entre les différentes tâches et réduire le nombre de variables à transmettre (cf. Figure 61). Ensuite, l'extraction des tables de référence à partir des fichiers CSV a posé un problème. En effet, il n'existe pas de fonction permettant simplement de lire les valeurs en C. Il a été nécessaire de coder une fonction spécifique pour chaque table (OCV, hystérosis et ECM) qui lit le fichier ligne par ligne, consommant ainsi beaucoup de ressources. C'est pourquoi les tables ne sont actualisées que lorsque cela est nécessaire. Les objectifs du WP3 du projet concernant l'estimation du SOC ont été atteints avec succès. Pour les températures entre 10°C et 45°C , la précision de l'estimation est en dessous de 2%. Pour une température à 0°C l'erreur est légèrement supérieur (2.9%), mais reste bien en dessous des 5% demandés.



2.3.2. Activités réalisées WP3_T3.2 : Développement de logiciel et interface UX/UI

Le WP3_T3.2 a été consacré à l'optimisation et l'implémentation d'un calculateur d'autonomie en temps réel appelé SmartBMS. Le SmartBMS est notamment capable d'estimer avec précision en temps réel le rayon d'action selon la topographie des parcours. Suite au travail de BFH, nous avons une erreur mesurée de 2%.

2.3.2.1. Logiciel de prédition de l'autonomie

Il est essentiel de comprendre les attentes des utilisateurs, qu'ils soient conducteurs ou opérateurs logistiques, et de collecter des informations clés comme les caractéristiques techniques des véhicules (type de batterie, puissance nominale, consommation énergétique), les conditions environnementales (topographie, température, vent), et les scénarios d'utilisation (poids transporté, distance typique, trajets fréquents). Ces données permettent d'établir un cahier des charges fonctionnel décrivant les fonctionnalités principales, telles que l'estimation en temps réel de l'autonomie restante ou les recommandations pour optimiser la conduite.

Une fois les besoins identifiés, il est nécessaire de concevoir une architecture logicielle adaptée. Cette architecture doit être modulaire et évolutive pour intégrer plusieurs composants : un module de collecte des données en temps réel (niveau de batterie, vitesse, consommation instantanée), un moteur de calcul de l'autonomie basé sur des algorithmes prédictifs, une interface utilisateur ergonomique affichant les résultats et les alertes, ainsi qu'un module de gestion des données pour stocker et analyser les données historiques afin d'améliorer les prédictions avec le temps. Une architecture bien conçue assure la robustesse et la facilité d'évolution du logiciel (Figure 62).

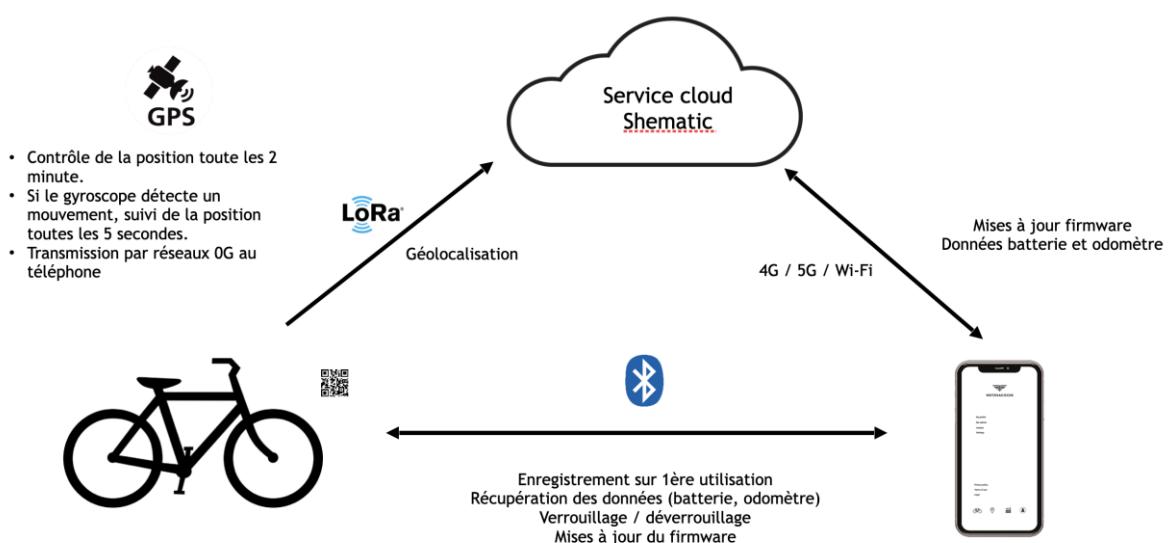


Figure 62 : Architecture du système de collecte de data

Pour alimenter le moteur de prédition, il faut collecter et structurer des données pertinentes. Cela inclut des informations sur le véhicule, comme la consommation énergétique par kilomètre, la capacité de la batterie, la vitesse du véhicule, la tension de la batterie, le courant de la batterie, et l'efficacité des moteurs, ainsi que des données environnementales, telles que la topographie et les conditions météorologiques. À cela s'ajoutent les données liées au comportement des utilisateurs, comme le style de conduite ou le poids transporté. Une fois collectées, ces données doivent être nettoyées et organisées dans une base structurée pour permettre une exploitation optimale par les algorithmes. Il est possible de visualiser ces données en direct depuis le serveur Figure 63



Le développement des algorithmes de prédition constitue le cœur du logiciel. Ceux-ci doivent combiner des modèles physiques et des techniques d'apprentissage automatique pour offrir des estimations précises. Les modèles physiques utilisent les lois d'énergie et de puissance pour calculer la consommation en fonction des paramètres actuels, tandis que les modèles d'apprentissage automatique exploitent les données historiques pour affiner les prévisions. Les algorithmes doivent aussi tenir compte des facteurs dynamiques, comme les changements de topographie ou de charge, pour ajuster les prédictions en temps réel.

L'intégration des données géographiques est également essentielle pour offrir des prédictions réalistes et adaptées aux trajets. Cela peut être réalisé en utilisant des API telles que Google Maps ou OpenStreetMap, qui fournissent des informations sur les itinéraires, y compris les pentes et les distances. Le logiciel doit exploiter ces données pour calculer l'impact des conditions de terrain sur l'autonomie et proposer des itinéraires optimaux en conséquence.

En parallèle, l'interface utilisateur du logiciel doit être développée pour offrir une expérience intuitive et accessible. Les informations clés, comme l'autonomie restante et les suggestions d'itinéraires optimaux, doivent être présentées de manière claire. Une carte interactive peut afficher la portée estimée sous forme de cercle autour de la position actuelle, tandis que des alertes peuvent signaler des baisses rapides d'autonomie ou recommander des points de recharge à proximité. Cette interface constitue la partie visible du logiciel et doit être optimisée pour répondre aux besoins des utilisateurs.

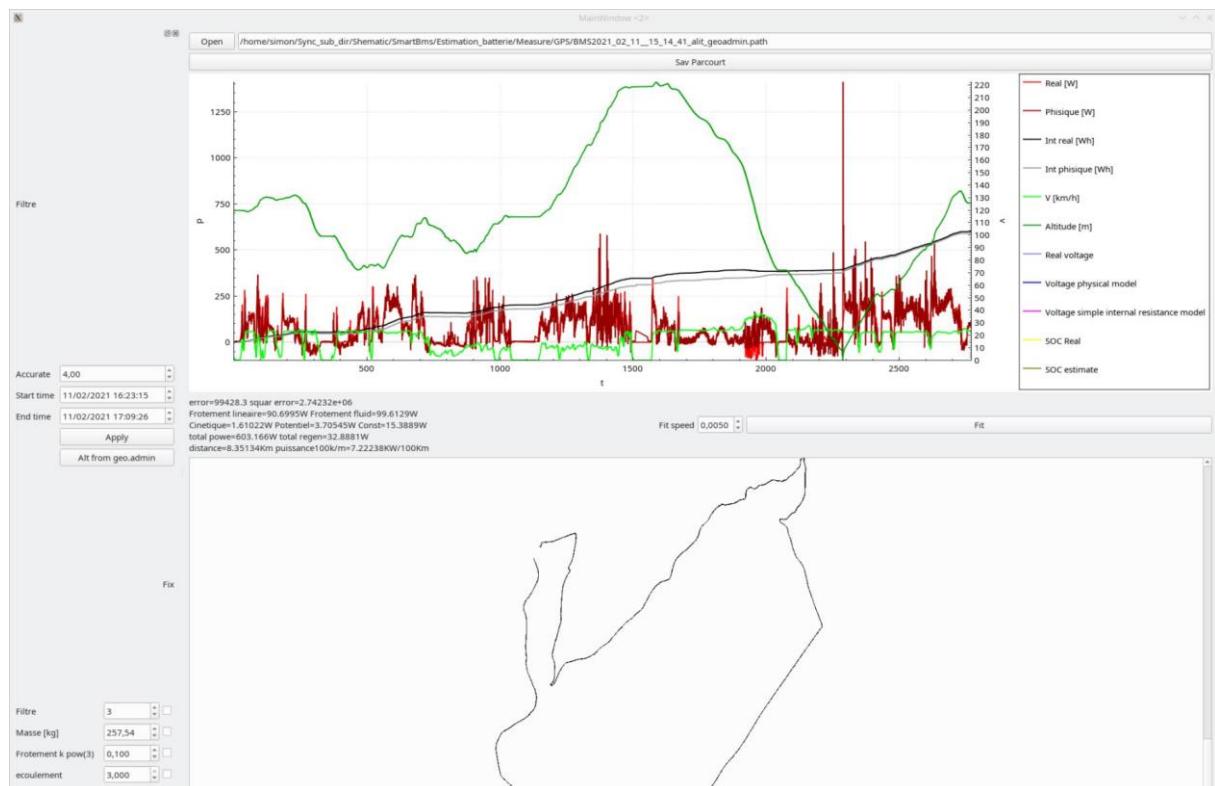


Figure 63 : Visualisation des données collectées



2.3.2.2. Architecture de l'interface UX/UI

Après le travail de design, nous arrivons à une application Yakbike qui permet de connaître l'autonomie du véhicule très précisément, envoyer le SOC restant à un gestionnaire de flotte, connaître la vitesse moyenne et combien de kg CO₂ l'utilisateur a économisé par rapport à une voiture.

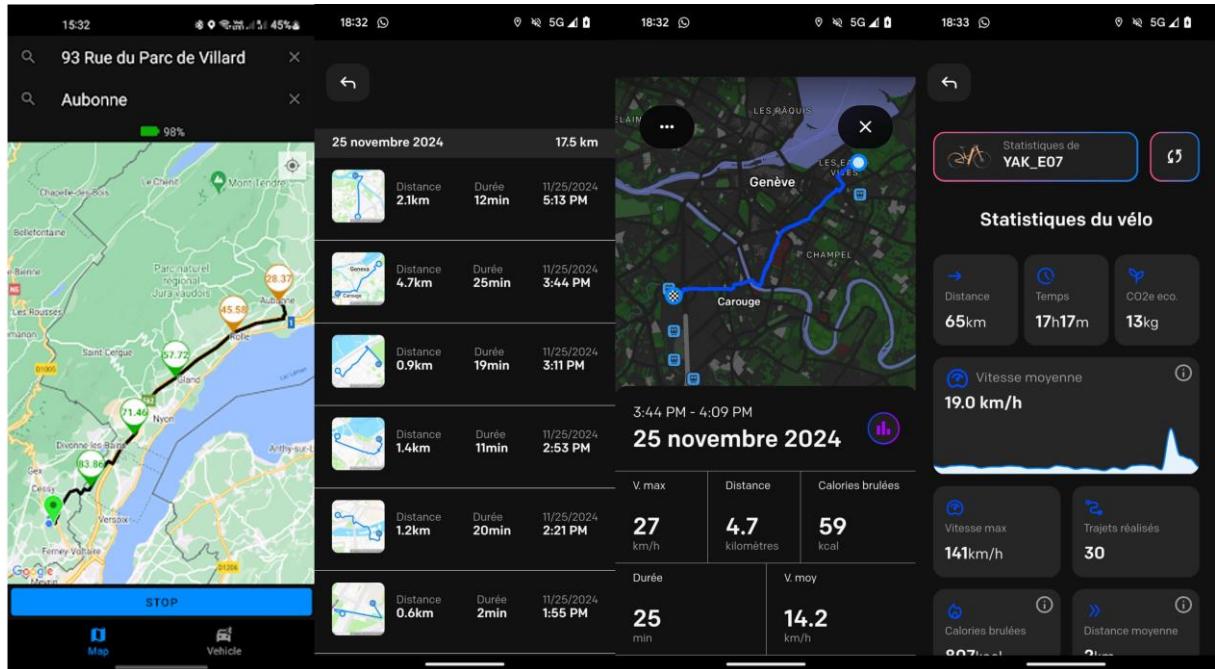


Figure 64 : Application mobile permettant de savoir l'autonomie restante et l'état du Yakbike

3 Conclusions et perspectives

3.1. Leçons tirées des résultats du projet FREA

Le projet FREA a fourni plusieurs enseignements précieux dans le domaine de la motorisation électrique pour les véhicules utilitaires légers (VULE). L'un des principaux constats est que l'intégration poussée des composants (moteur, réducteur, onduleur) est essentielle pour maximiser la compacité et l'efficacité énergétique tout en réduisant les coûts de production et de maintenance. Cette approche a permis de surmonter les limitations des systèmes traditionnels et d'atteindre des performances significatives sur un Yakbike qui circule à un rendement de 87% 70% de son temps d'utilisation (Figure 65).

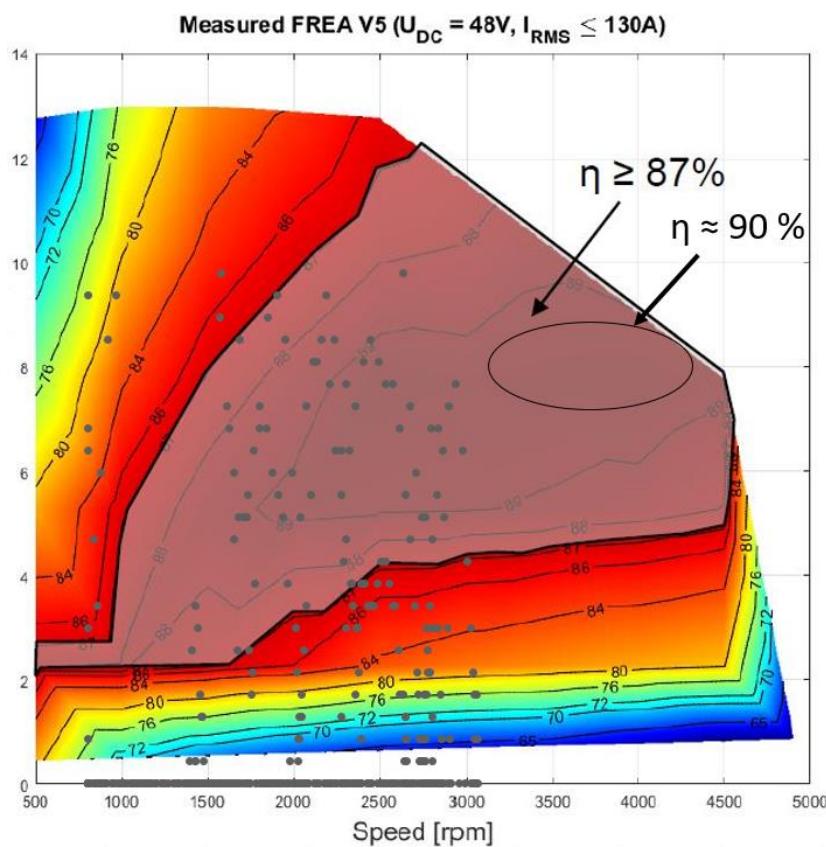


Figure 65 : Corrélation entre les points de fonctionnement d'un Yakbike et le rendement d'un moteur FREA

Une autre leçon importante réside dans la modularité et la flexibilité du système. Le développement d'un moteur modulaire, capable de s'adapter à divers types de véhicules, a ouvert de nouvelles perspectives pour une intégration plus large dans différentes applications. Par ailleurs, la collaboration étroite avec des partenaires industriels et académiques a joué un rôle clé dans la validation des technologies et des concepts, prouvant l'importance d'un écosystème de recherche et développement bien structuré et développé en Suisse.

Enfin, le projet a mis en lumière l'importance de la prise en compte des attentes des utilisateurs finaux dès les premières étapes de conception. Les tests terrain avec Ecomotrice et Kyburz ont révélé des besoins spécifiques en termes de robustesse, d'autonomie et de facilité d'utilisation, ce qui a conduit à des ajustements cruciaux pour garantir la pertinence du produit sur le marché.



3.2. Estimation et appréciation des résultats

Tous les sujets présentés ont été traité et nous avons atteint les objectifs techniques ont été atteints, voire dépassés dans certains cas, comme le rendement énergétique moyen de 90 %, une erreur de 0.5% sur un trajet de 100 km et la certification du contrôleur moteur.

Les prototypes fonctionnels ont démontré leur efficacité lors des essais terrain, et les retours des partenaires industriels confirment l'adéquation de FREA aux besoins actuels de la mobilité urbaine durable. En termes d'impact environnemental, en 2024, Ecomotrice a effectué 40000 km avec des Yakbike. Ecomotrice a économisé 6710 litres de diesel soit 18 tonnes de CO₂. Les projections montrent une réduction cumulative de 720 000 tonnes de CO₂ d'ici 2050, ce qui souligne la contribution significative de ce projet à la transition énergétique.

Le projet a également permis de poser les bases d'une industrialisation réussie, avec des processus de production validés pour des lots pilotes. Toutefois, certaines optimisations restent nécessaires pour réduire davantage les coûts et simplifier les étapes de fabrication, notamment en ce qui concerne l'intégration des composants électroniques.

3.3. Prochaines étapes et mise en œuvre future

La prochaine étape clé consiste en la transition de la phase de prototypage à la production à grande échelle. Cela inclut l'optimisation des processus de fabrication, le renforcement de la chaîne d'approvisionnement et l'établissement de partenariats avec de nouveaux fabricants véhicules intéressés par FREA. Une stratégie de commercialisation doit également être élaborée pour positionner le produit sur le marché suisse et européen.

Une priorité immédiate est le déploiement d'un programme pilote plus vaste avec des flottes de Yakbike en conditions réelles. Ces essais permettront d'affiner les paramètres de performance, de recueillir des données supplémentaires pour le modèle de prédiction de l'autonomie.

Parallèlement, la poursuite des travaux sur l'amélioration des algorithmes de gestion de l'énergie et l'intégration de nouvelles fonctionnalités, comme des systèmes avancés de diagnostic et de maintenance prédictive, pourrait augmenter la valeur ajoutée du produit.



4 Bibliographie

- [1] Mariusz Nürnberga, «Analysis of using cargo bikes in urban logistics on the example of Star-gard,» ELSEVIER, Poland, 2019.
- [2] T. R. U. E. Initiative, «On-road motor vehicle emissions in Paris,» FIA, Londres, 2019.
- [3] UNECE - WP.29, «WLTP facts,» [En ligne]. Available: <https://www.wltpfacts.eu/from-nedc-to-wltp-change/>.
- [4] S. C. & L. Sloman, «Potential for (e)-cargo bikes to reduce congestion and pollution from,» London, 2018.
- [5] P. C. A. V. D.Luder, «"Current developments of Battery management Systems",» chez PCIM Europe digital days 2020, international Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy Management, Germany, 2020.
- [6] E-Cube, «Potentiel de réduction des émissions grâce à des motorisations alternatives,» 2020.
- [7] Nagra, «Entsorgungsprogramm 2016 (NAB 16-01),» Nagra, Wettingen, 2016.
- [8] Bundesamt für Energie, «Umgang mit den Stellungnahmen der Regionalkonferenzen zu Etappe 2,» Bundesamt für Energie, Bern, 2017.
- [9] Bundesamt für Energie, «Ergebnisbericht zu Etappe 2: Festlegung und Objektblätter; Entwurf vom 22. November 2017,» Bern, 2017.
- [10] Alexandros Nikolian, Joris Jaguemonta, Joris de Hoog, «Complete cell-level lithium-ion elec-trical ECM model for different chemistries (NMC, LFP, LTO) and temperatures (−5 °C to 45 °C),» ELSE-VIER, n° %1https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.11.031, 2017.
- [11] Theodoros Kalogiannis, Md Sazzad Hosen, Mohsen Akbarzadeh Sokkeh, «Comparative Study on Parameter Identification,» MDPI, p. 10, 2019.
- [12] *. R. G. a. B. Y. L. Saeed Sepasi a, «A novel on-board state-of-charge estimation method for aged Li-ion batteries based on model adaptive extended Kalman filter,» ELSEVIER, no. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.06.108>, pp. 337-344, 2014.
- [13] Wikipedia, «Worldwide Harmonised Light Vehicles Test Procedure,» 2 10 2022. [En ligne]. Avai-lable: https://en.wikipedia.org/wiki/Worldwide_Harmonised_Light_Vehicles_Test_Procedure.
- [14] A. Zucconi, «The Extended Kalman Filter,» 24 July 2022. [En ligne]. Available: <https://www.alan-zucconi.com/2022/07/24/extended-kalman-filter/>.
- [15] Knap, Vaclav; Stroe, Daniel Loan; Teodorescu, Remus; Swierczynski, Maciej Jozef; Stanciu,Ti-beriu, «Comparison of Parametrization Techniques for an Electrical Circuit Model of Lithium-Sulfur Bat-teries,» IEEE Xplore, p. 4, 2015.
- [16] B. L. L. (, D. C. B. (, P. I. (, P. A. (, Dr. Alejandro Santis (main, «Battery Testing Manual v04,» BFH, Bienne, 2019.