

Bobinages dentaires à barre cylindrique basse tension.

Philippe Enrici, Mourad Aitakkache, Daniel Matt, Carole Henaux, Jaafar Elwati

Institut d'Électroniques et des Systèmes (IES)-CNRS UMR 5214, Université de Montpellier, Montpellier 34095, France

RESUME – Cet article présente la conception d'un bobinage basse tension dentaire dit par quartier développé dans le groupe Génie Electrique Matériaux et Systèmes. Ce type de bobinage a été utilisé pour des applications aéronautiques et de propulsion terrestre. Les moteurs étudiés sont des moteurs synchrones à aimant permanent pour une application nautique de loisir. Deux types de bobinages pour deux prototypes ont été réalisés pour effectuer une comparaison de ceux-ci. Les bobinages sont réalisés avec des barres cylindriques permettant d'optimiser leurs coefficients de remplissage, le volume de leurs têtes de bobines et la conception de ceux-ci. Après une introduction et une description des bobinages usuels, les caractéristiques du bobinage par quartier sont définis. Les prototypes et le banc de test sont décrits. Les résultats expérimentaux et de simulations sont présentés, enfin une approche acoustique est faite pour les deux bobinages.

Mots-clés— *Bobinage à barre, bobinage dentaire, bateau électrique, moteur synchrone à aimant.*

1. INTRODUCTION

L'électrification des systèmes est devenue un enjeu majeurs face à la décarbonation des systèmes de propulsion, aussi les technologies basées sur l'énergie électrique occupent une place de plus en plus centrale. L'objectif est d'améliorer les performances énergétiques et les rendements de ses systèmes. Cette électrification se fait principalement par l'introduction d'actionneurs électriques performants dans les systèmes embarqués. Cette nouvelle ère de l'électrification ne se limite pas au domaine de l'automobile. Le secteur aérien définit la propulsion de demain, plus optimisée, plus économique et surtout, plus écologique. Le programme "Clean sky" en est un exemple, mais aussi le projet HASTECS (Région Occitanie France) dont l'objectif est d'analyser le potentiel d'hybridation énergétique d'un avion régional d'environ 70 places, avec un rayon d'action situé entre 600 et 800 kilomètres [1].

La propulsion électrique des navires de forte puissance a été développé depuis de longue année. La principale justification de la propulsion électrique était le découplage entre la production de l'énergie et son utilisation. L'énergie électrique nécessaire y est généralement produite par des systèmes moteurs thermique-alternateur. Ces navires sont équipés de moteurs électriques placés dans des nacelles, portant une ou deux hélices et installés sous la coque du navire, ils sont fixes ou plus habituellement orientables, ce système est appelé POD. Il existe les POD propulseur ou le moteur est dans la coque du navire, l'hélice est entraînée par une transmission par arbre comprenant des renvois d'angle, cette propulsion est connue sous les noms de propulseur azimutal. La deuxième solution est le POD moteur-propulseur qui contient un moteur qui entraîne directement une ou deux hélices, solution choisie pour notre application représentée sur la Figure 1.

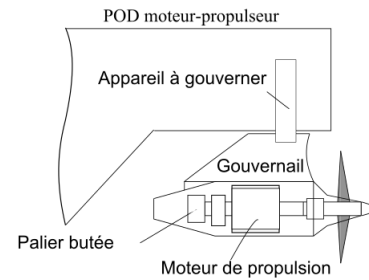


Fig. 1. Vue d'un POD.

Cette électrification se fait aussi pour les bateaux de petite puissance et de loisirs, dans ce cas le système est autonome et l'énergie est issue d'une batterie de stockage. En général, la tension d'alimentation est de 48 à 96 volts selon les modèles, la puissance de 3 à 30 kW et la vitesse de rotation de 1750 à 3 000 tr/mn.

En plus de l'impact positif sur l'environnement d'un bateau électrique comparé à la motorisation thermique, le passage à l'électrique permet les avantages suivants :

- Amélioration du rendement énergétique,
- Réduction du volume interne,
- Réduction importante de l'encombrement et du poids des machines à bord du navire,
- Utilisation du propulseur comme gouvernail,
- Simplification de la liaison machine hélice.

La vitesse de rotation N pour notre actionneur est de 1 500 tr/min qui est la vitesse de rotation de l'hélice. La position du moteur se situant directement derrière l'hélice impose une limite de 12 cm de diamètre pour le moteur et la carcasse le contenant. Pour des raisons de sécurité, la tension choisie pour ces moteurs est de 60V qui est le niveau de référence VLV (CLASS A) pour les véhicules électriques [2]. Avec des moteurs à basse tension, l'utilisation d'un bobinage à barres massives est le choix le plus judicieux, car cela permet un meilleur taux de remplissage de l'encoche et la minimisation de la taille des têtes de bobines qui sont plus compactes que dans le cas d'un bobinage filaire. L'efficacité de ce type de bobinage a bien été démontré avec la construction de plusieurs prototypes pour des applications terrestres [3-4-5].

La puissance choisie est imposée par la législation française qui correspond à la limite de puissance pour obtenir une licence de bateau, soit une puissance P de 4,5 kW. L'entraînement est à attaque directe comme représenté sur la Figure 1, sans réducteur mécanique, pour simplifier le système et réduire les pièces mécaniques afin d'éviter des interventions de maintenances supplémentaires.

Cet article est divisé en trois sections, une première section sur la présentation des bobinages étudiés dans les moteurs synchrones. Une description des caractéristiques du bobinage dentaire par quartier est faite, ainsi que le bobinage réparti à barres et les têtes de bobines. Des essais expérimentaux sont comparés aux résultats de simulations par éléments finis (Maxwell). Une dernière partie présente une approche acoustique par simulation (Comsol) sur les deux types de bobinages.

2. BOBINAGES DES MOTEURS SYNCHRONES

2.1. Introduction

Afin d'accroître la puissance massique d'un moteur synchrone à aimant permanent MSAP, une solution consiste à couple et vitesse donnée d'augmenter la fréquence électrique f par le biais du nombre de paires de pôles p du rotor. L'épaisseur des culasses magnétiques étant inversement proportionnelle au nombre de pôles, l'augmentation de la fréquence minimise le volume du circuit magnétique. De ce fait, les longueurs et la masse des têtes de bobines sont également réduites.

La Figure 2 illustre l'effet du triplement de la fréquence sur les dimensions d'une MSAP en passant de 533 Hz (prototype réel) à 1600 Hz, avec une vitesse et un couple maintenu constant.

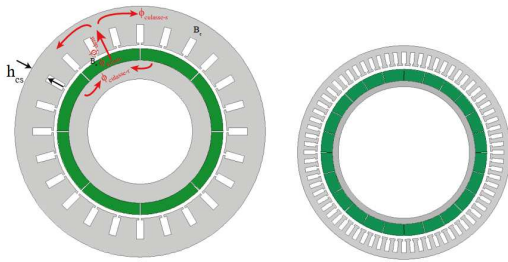


Fig. 2. Effet de l'accroissement de la fréquence (triplément) sur les dimensions d'un actionneur [5]

Pour faciliter la comparaison des deux structures, il faut analyser, pour chaque moteur, la hauteur de la culasse statorique par rapport aux autres dimensions comme la hauteur de la dent ou celle des aimants.

Pour un bobinage classique à pas diamétral (distribué), le nombre d'encoches N_{enc} est directement proportionnel au nombre de paires de pôles p , q le nombre d'encoches par pôle et par phase et m le nombre de phases, expression donnée par la relation (1).

$$N_{enc} = 2 \cdot q \cdot p \cdot m \quad (1)$$

L'augmentation de la fréquence est très limitée à cause de la faisabilité et de la construction des motifs d'encoches (largeur de dent très petite). Pour répondre à cette contrainte, il est possible d'utiliser une topologie de MSAS non conventionnelle, dite à effet Vernier permettant de s'affranchir de ce problème. En effet, pour une machine Vernier le pas polaire du bobinage et le pas polaire rotorique sont découplés, nous avons une machine à couplage dentaire [6]. Le nombre d'encoches N_{enc} et le nombre de paires d'aimants au rotor N_R doit vérifier la relation (2).

$$|N_{enc} - N_R| = p \quad (2)$$

La figure 3 représente un exemple de Moteur synchrone à effet Vernier.

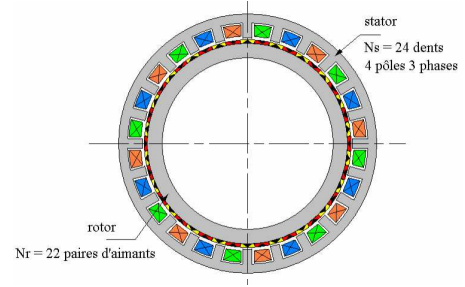


Fig. 3. Moteur synchrone Vernier

Une autre technique pour augmenter la fréquence de conversion consiste à utiliser un bobinage fractionnaire concentré autour des dents (dentaires). Ces bobinages, caractérisés par un nombre d'encoches par pôle et par phase q inférieur ou égal à $1/2$, permettent d'augmenter le nombre de pôles tout en gardant un nombre d'encoches restreint [7]. Un exemple peut être visualisé sur la Figure 4.

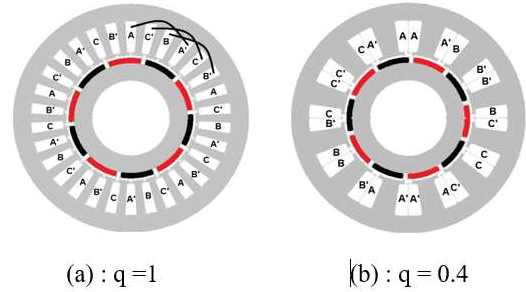


Fig. 4. Bobinage à pas complet et bobinage fractionnaire

Cependant, l'augmentation de la fréquence de conversion s'accompagne d'un accroissement des pertes spécifiques dans les circuits magnétiques et dans le bobinage (pertes adimensionnelles). Ces phénomènes créent des contraintes supplémentaires d'ordre électromagnétique et thermique, soit côté électronique de commande, soit côté motorisation.

2.2. Bobinages à barre cylindrique

Dans l'optique d'accroître les performances des moteurs électriques (facteur de remplissage du cuivre dans l'encoche), des travaux de recherche sur le bobinage à barres pour les MSAP ont émergé [8]. La technologie aussi particulière que complexe est dite Hairpin (bobinage en épingle) qui permet le positionnement des barres au niveau des chignons. La technique consiste à enfiler les conducteurs de type méplat, soigneusement tordus pour former les bons motifs (en U), dans les encoches par translation axiale, et ensuite, les plier puis les souder entre eux de l'autre côté du stator pour former les têtes de bobines.

L'originalité du bobinage que nous proposons ici réside dans la technique inventée pour la réalisation des chignons, à base des barres courtes, cintrées et alternées par-dessus et par-devant [5]. Dans nos conceptions antérieures, nous utilisions des barres rectangulaires à la place d'un bobinage à fil rond. Remplacer les fils ronds par une barre massive permet :

- D'augmenter le volume de cuivre dans l'encoche et par conséquent d'augmenter le coefficient de bobinage,
- De quasiment fermer l'ouverture d'encoche,
- D'avoir des têtes de bobine compactes,
- Simplifier le design du bobinage.

Pour cette application de motorisation de bateau électrique, nous avons choisi d'utiliser des barres cylindriques comme le montre la Figure 5. Ce choix a été fait pour valider le concept de

leur utilisation, mais aussi pour leur faciliter de conception, en effet ces types de barres sont accessibles dans le commerce sans usinage particulier.

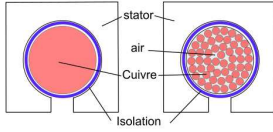


Fig. 5. Encoche et conducteur à barre ronde

L'utilisation d'un bobinage à barres augmente les pertes Joules supplémentaires suivant la fréquence de fonctionnement. Dans le cas d'une barre logée dans une encoche et traversé par un courant, ce dernier crée un flux de fuite qui crée à son tour des courants de Foucault dans la barre conductrice, nous avons alors une distribution non uniforme de la densité de courant. Nous définissons un coefficient de majoration de la résistance K qui est égal au rapport entre la résistance effective en courant alternatif R_{AC} et la résistance statique (ohmique) R_{DC} du conducteur. Dans [9] et [10], des détails supplémentaires sont donnés sur le calcul et l'estimation des pertes Joules supplémentaires dans les barres massives des machines électriques.

Pour nos applications nautiques, les fréquences d'utilisations sont voisines de 650 Hz soit un coefficient théorique de pertes supplémentaires $K = 1.1$.

3. BOBINAGES ETUDIES

3.1. Bobinage par quartier

Les bobinages dentaires sont utilisés dans de nombreuses applications industrielles pour leurs têtes de bobines très compactes et une tolérance aux défauts élevée grâce à la séparation physique des bobines.

Le principe d'un bobinage dentaire par quartier présenté à la Figure 6 à la particularité d'avoir chaque phase logée dans un quartier (série d'encoches successive ou le pas d'encoche τ_u est égal au pas polaire τ_p) séparé physiquement d'une dent dite de déphasage d'un angle δ_{ph} permettant d'assurer un déphasage de 120° entre les grandeurs électriques [5][9].

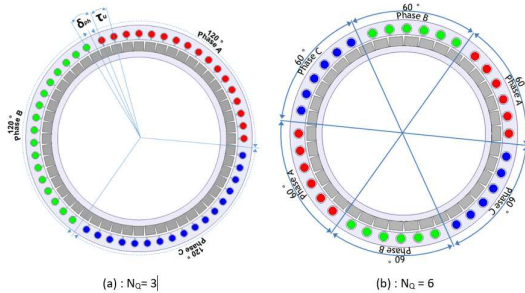


Fig. 6. Bobinage par quartier [9]

L'angle du quartier est de 120° pour le cas d'un bobinage à 3 quartiers (cf. Figure 6-a), de 60° chacun dans le cas d'un bobinage à 6 quartiers (cf. Figure 6-b), il est également possible d'augmenter davantage le nombre de quartiers N_Q .

Afin d'avoir un coefficient de bobinage unitaire, il faut respecter les conditions sur le nombre de paires de pôles p et l'angle de déphasage δ_{ph} . Pour une machine triphasée le rapport du nombre de pôles sur le nombre de quartiers (N_Q) doit obéir à la relation (3).

$$\frac{2 \cdot p}{N_Q} = \alpha + \frac{k}{3}, \quad \text{avec } \alpha \in \mathbb{N} \text{ et } k = 1, 2 \quad (3)$$

Pour une machine triphasée, le nombre de quartiers est un multiple de 3 soit $N_Q = 3 \cdot M_3$ donc la relation (3) devient la relation (4).

$$2 \cdot p = M_3 \cdot (3 \cdot \alpha + k) \quad (4)$$

Pour identifier le nombre de paires de pôles p possible selon le nombre de quartiers N_Q , il suffira de faire un balayage du nombre α . Le Tableau 1 donne un aperçu des valeurs $2p$ possible selon N_Q pour les valeurs de α .

Tableau 1. Nombre de pôles $2p$ en fonction du nombre de quartier N_Q [9]

N_Q		3	6	9	12	...	21
M_3		1	2	3	4		7
α	k						
1	1	4	8	12	16		28
	2		10		20		
2	1		14		28		
	2	8	16	24	32		56
3	1	10	20	30	40		70
	2		22		44		
...							
10	1		62		124		
	2	32	64	96	128		224

Un bobinage dentaire par quartiers se caractérise par la dent de déphasage. Pour que la machine soit équilibrée, l'angle de déphasage δ_{ph} s'écrit selon la relation (5).

$$\delta_{ph} = \frac{2\pi}{N_Q} - \tau_p \cdot (Q-1), \quad Q = \frac{N_{enc}}{N_Q} \quad (5)$$

Le nombre d'encoches par quartiers N_{encQ} est calculé avec la relation (6).

$$N_{encQ} = \frac{2p}{N_Q} - \frac{4}{3} \cdot k + 1, \quad k = 1, 2; k \in \mathbb{N} \quad (6)$$

Le Tableau 2 présente pour exemple quelques différentes possibilités existantes entre le nombre de quartiers N_Q , le nombre d'encoches N_{enc} et le nombre de pôles $2p$.

Tableau 2. Nombre de pôles $2p$ en fonction du nombre d'encoche N_{enc} et nombre de quartier N_Q [9]

N_Q		3		6		9		
N_{enc}								
6	4	8	10	4	8	10		
9	8	10	14				6	12
12	10	14	16	10	15	16		
15	14	16	20					
...								
51	50	52	56					
54	52	56	58	52	56	58	48	60

Dans le tableau 2 pour un nombre de quartiers N_Q nous avons trois possibilités de nombre de pôles $2p$ pour le nombre d'encoches N_{enc} . Dans le cas où $N_Q = 3$ et $N_{enc} = 51$ nous avons trois solutions avec un nombre de pôles au rotor égal à 50, 52 ou 56. Suivant le cas, c'est la largeur de la dent de déphasage qui sera modifiée, cependant les simulations éléments finis ont montré que la valeur du couple est, lui aussi, impacté. Les résultats des simulations sont représentés sur la Figure 7.

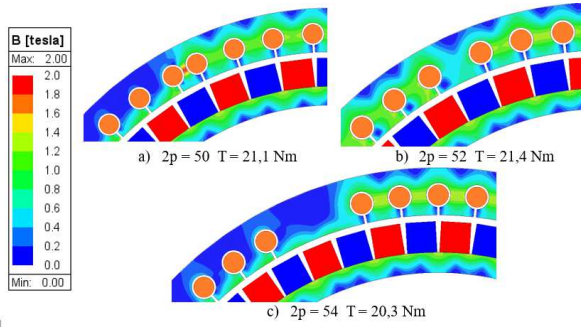


Fig. 7. Induction magnétique dans la dent de déphasage et calcul du couple [9]

Pour ce type de bobinage par quartier, la FMM est non symétrique comme représentée sur la Figure 8, cela est dû à la répartition des phases du bobinage, mais sa valeur moyenne est bien nulle.

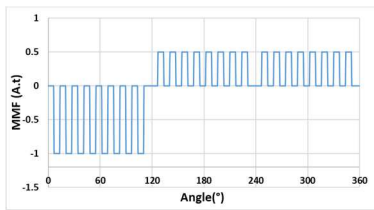


Fig. 8. Bobinage par quartier

Le spectre harmonique de la FMM suivant le nombre de quartiers obtenu par simulation est représenté sur la figure 9 pour 3 et 6 quartiers avec $2p=38$ pôles. Dans ce cas l'harmonique de travail est égale à p , soit 19, nous pouvons voir que l'augmentation du nombre de quartiers permet de réduire les sous harmoniques néfastes au comportement vibratoire de la machine.

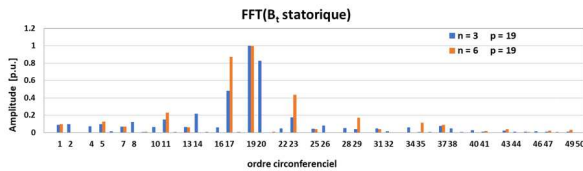


Fig. 9. Bobinage par quartier [9]

3.2. Bobinage distribué à barre à pas diamétral

Afin de comparer les performances du bobinage par quartier utilisé dans nos applications, nous avons conçu un bobinage à pas diamétral à barre cylindrique. Le bobinage distribué est à pas diamétral avec $q = 1$ (une encoche par pôle et par phase) présenté à la Figure 10.

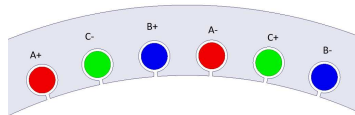


Fig. 10. Bobinage distribué à pas diamétral avec $q=1$

La conversion d'énergie avec un bobinage distribué à pas diamétral s'effectue par l'interaction des fondamentaux des champs statorique et rotorique.

3.3. Tête de bobines

L'originalité d'utiliser un bobinage à barre réside dans la conception de ses têtes de bobines. Nous pouvons voir sur la Figure 11 la réalisation des têtes de bobines pour un bobinage dentaire par quartier ($N_Q = 3$).

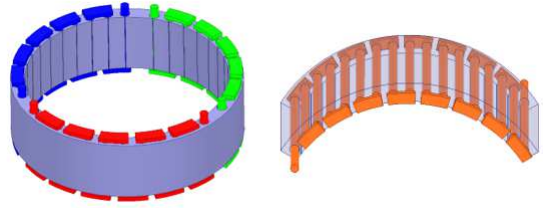


Fig. 11. Vue des têtes de bobines

Dans le cas où le nombre de quartiers est supérieur à 3, il est possible d'effectuer une mise en série de deux quartiers de chaque phase. Ces quartiers étant diamétralement opposés, leur mise en série rajoutera de la complexité supplémentaire et augmentera la taille des têtes de bobines en allant à l'encontre de l'un des principaux avantages d'un tel bobinage. Nous pouvons visualiser cette configuration sur la Figure 12 pour $N_Q = 6$.

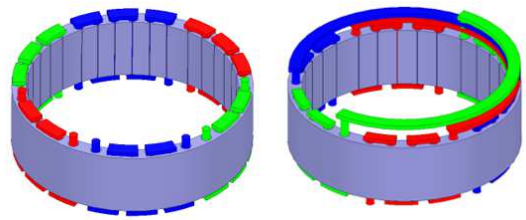


Fig. 12. Têtes de bobines pour $N_Q = 6$ quartiers séparés et quartiers en série

Dans le cas d'un bobinage réparti nous pouvons voir ses têtes de bobines sur la figure 13.

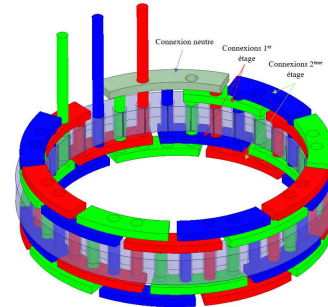


Fig. 13. Têtes de bobines pour un bobinage réparti avec $N_{enc} = 36$

4. RÉSULTATS DE SIMULATIONS ET EXPERIMENTAUX

4.1. Prototypes

Un pré-dimensionnement analytique a permis de définir les paramètres du moteur pour un bobinage à 3 quartiers avec des barres cylindriques de 3 mm. Nous rappelons que l'alimentation est une alimentation DC basse tension de 48 V, la puissance du moteur 4,5 kW pour une vitesse de rotation de 1 500 tr/min. Le nombre d'encoches N_{enc} calculé est égale à 51 et le nombre d'aimants (nombre de pôles rotorique $2p$) est égale à 52 (cf 3.1).

Deux moteurs synchrones à aimants permanents avec des aimants montés en surface ont été réalisés, un avec le bobinage distribué à pas diamétral qu'on appellera M-R et l'autre avec le bobinage dentaire par quartier M-Q, les deux stators étant réalisés avec des barres cylindriques de 3 mm. Pour les deux moteurs, Figure 14, les matériaux utilisés sont identiques, à savoir des tôles magnétiques M270-35A pour le stator et le rotor et du NdFeB pour les aimants avec $B_r = 1,26$ T et $H_c = -12\,000$ A/m.

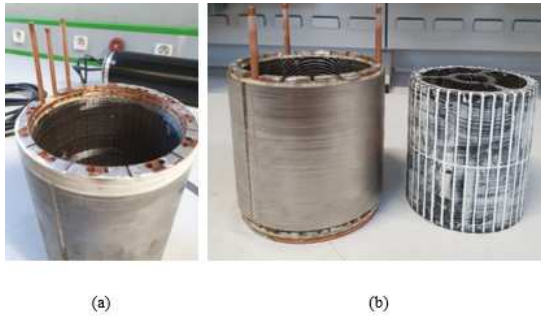


Fig. 14. a) stator du moteur M-R, b) stator et rotor du moteur M-Q

Les caractéristiques géométriques des moteurs sont présentées dans le Tableau 3.

Tableau 3. Dimensions.

Dimensions		M-R	M-Q
Nombre d'encoche	Nenc	48	51
Nombre d'aimant	2p	16	52
Diamètre extérieur	Dex (mm)	112	110
Longueur Stator	Ls (mm)	135	150
Dent de déphasage	δ_{ph} (°)	/	9,23
Entrefer	e (mm)	1	1
Rayon d'entrefer	Re (mm)	48	48
Épaisseur culasse stator	hcs (mm)	3,9	2,24
Diamètre de l'encoche	denc (mm)	3,6	3,6
Ouverture d'encoche	oenc (mm)	0,4	0,4
Hauteur de l'isthme	hsth (mm)	0.,	1,12
Hauteur aimant	ha (mm)	3	4,5
Largeur aimant	la (mm)	17,1	4,84
Épaisseur culasse rotor	hcr (mm)	4,5	3

4.2. Banc expérimental

Un banc expérimental a été conçu pour l'étude et la caractérisation des deux prototypes. Celui-ci est décrit sur la Figure 15.

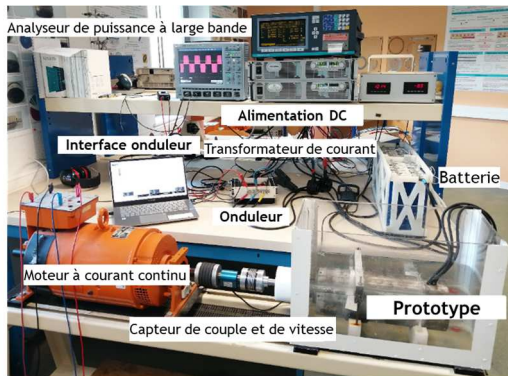


Fig. 15. Banc de test [9]

La commande choisie pour piloter nos moteurs est la commande vectorielle FOC (Field Oriented Control), cette commande a été choisie, car elle permet de réaliser une commande sans capteurs, l'implantation de capteurs pouvant s'avérer contraignantes, notamment du fait de problématiques d'étanchéités.

4.3. Résultats expérimentaux et simulation EF

L'inaccessibilité du neutre des deux machines a fait que les FEM mesurées sont des FEM entre phases, sur la Figure 16 les FEM obtenues par les mesures et par la simulation à une vitesse de rotation de 1500 tr/min sont comparées.

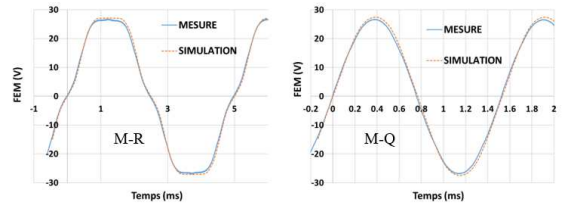


Fig. 16. FEM des moteurs mesurée et simulée

Les tests expérimentaux et les calculs en élément finis réalisés nous ont permis de caractériser les deux machines et les résultats sont donnés dans le Tableau 4. Le modèle électrique est un modèle RLE de Behn-Eschenburg.

Tableau 4. Paramètres électriques.

	M-R	M-R EF	M-Q	M-Q EF
Résistance R_s [m Ω]	8,5	6,3	8	7
Constante f.e.m. K_e [V.s/rd]	0,075	0,077	0,067	0,072
Constante couple K_T [Nm/A]	0,22	0,24	0,2	0,21

Sur la Figure 17, nous observons le couple obtenu par simulation pour les deux moteurs. Le couple de détente a une amplitude plus importante dans le cas d'un bobinage à pas diamétral que dans le cas d'un bobinage dentaire par quartiers.

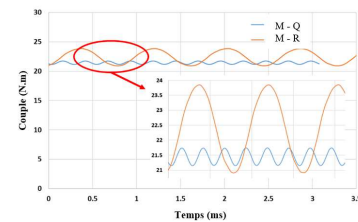


Fig. 17. Couple et ondulation de couple

Les résultats des mesures du rendement sont présentés sur la Figure 18. Le rendement mesuré avec la méthode de mesure directe du couple comprend les pertes par frottement du joint à garniture assurant l'étanchéité du réservoir à eau.

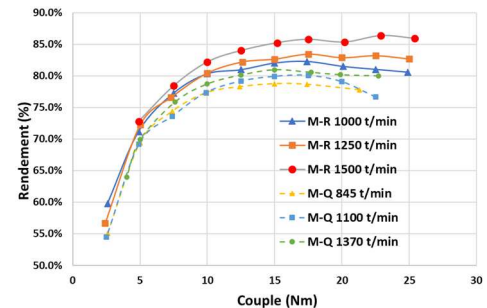


Fig. 18. Rendement en fonction du couple pour différentes vitesses de rotation

Le Tableau suivant reprend, sous forme synthétique, l'ensemble des performances des deux solutions M-R et M-Q.

Tableau 5. Performances comparées.

	M-R	M-Q
Rendement	++	+
Couple massique (Nm/kg)	4,6	5,6
Masse des parties actives (kg)	6,5	5,4
Fréquence (Hz)	200	650
Forme FEM	Trapézoïdale	Sinususoïdale
Complexité des têtes de bobines	--	++
Dépassement des Têtes de bobines (mm)	11	6
Bruit	++	---

5. APPROCHE ACOUSTIQUE

La topologie de bobinage par quartiers est une source de bruit importante comparé à un bobinage répartie classique, ceci a été vérifié pendant les essais effectués sur notre banc de test et par le retour d'expérience des moteurs équipés de ce même bobinage réalisés dans les précédents travaux par notre équipe. Dans un bobinage à 3 quartiers (asymétrique), les forces magnétiques ne sont pas distribuées de façon uniforme sur le stator comme le montre la Figure 19, une force résultante unidirectionnelle est créée, cette dernière est tournante et agit comme force attractive [11].

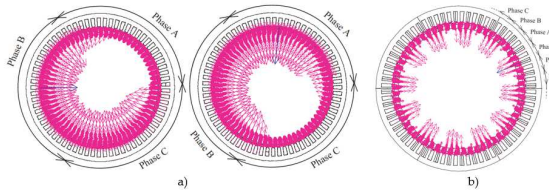


Fig. 19. Force magnétiques radiales sur le stator, a) bobinage asymétrique à deux instants différents. b) bobinage symétrique.

L'analyse du comportement vibro-acoustique du moteur passe par trois études simulées dans COMSOL.

- Analyse transitoire : calcul des efforts électromagnétiques dans le domaine temporel pour une vitesse de rotation donnée.
- Conversion des efforts du domaine temporel aux différents harmoniques dans le domaine fréquentiel.
- Analyses acoustiques pour chaque harmonique et pour différentes vitesses de rotations.

La contribution des 4 premiers harmoniques dans la génération de bruit est représentée sur le diagramme de Campbell de la Figure 20. Sur ce diagramme, nous retrouvons le niveau de pression acoustique en dB généré pour chaque harmonique en fonction de la vitesse de rotation à un point donné. Ici la position du microphone pour la simulation est à 50 cm à côté du moteur.

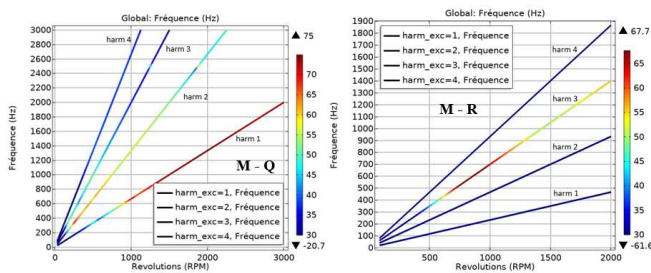


Fig. 20. Diagramme de Campbell (premier harmonique en bas et sous harmoniques au-dessus)

Sur les simulations se sont les deux premiers harmoniques qui sont les plus responsables du niveau de pression acoustique mesuré. Le moteur M-Q génère plus de bruit que le moteur M-R. Une solution logique est d'augmenter le nombre de quartiers permettant d'équilibrer les efforts appliqués sur le stator comme nous le constatons dans le Tableau 6.

Tableau 6. Performances comparées.

N_Q	3	6	9	12
Niveau (dB)	87	62	63	52

Cette solution est très efficace en considérant la possibilité d'utiliser plusieurs onduleurs ou la mise en série des quartiers de la même phase.

Une autre solution envisagée pour le bobinage par quartier est de créer une modification de la largeur des dents pour $\tau_p \neq \tau_d$, mais nous aurons alors une diminution du couple comme présenté dans le Tableau 5.

Tableau 5. Performances comparées $N_Q = 3$.

Augmentation (°)	0	0.3	0.5
Niveau (dB)	75	62	68
Pertes sur le couples (%)	-	7,5	24

6. CONCLUSIONS

Dans cet article, une comparaison est effectuée entre deux moteurs basse tension destinés à une application de bateau électrique. Le premier utilise un enroulement distribué à pas diamétral, tandis que le second est doté d'un enroulement concentré par quartier. Les enroulements des deux moteurs sont réalisés à partir de barres pleines de forme cylindrique. Pour les spécifications de cette application, le moteur à enroulement distribué à un rendement plus élevé, atteignant 88% et s'avère mieux adapté que celui à enroulement concentré par quartier. Cette étude montre la faisabilité du bobinage distribué avec des barres cylindriques pour tout système d'électrification. Elle met également en évidence l'intérêt d'un bobinage dentaire par quartier basse tension pour l'électrification des systèmes de propulsion.

7. REMERCIEMENTS

Nous remercions la région Occitanie pour la bourse doctorale permettant le financement du doctorant.

8. REFERENCES

- [1] S. Touhami, "Analytical Sizing Models to Assess the Performances of High Specific Power Electric Motors for Hybrid Aircraft", Thèse de Doctorat, INPT Toulouse, 2020.
- [2] 2006/95/EC. The European Parliament's Low Voltage Directive, Official Journal of the European Union, 2016 (Online resource).
- [3] D. Matt, N. Boubaker, M. Aitakkache, P. Enrici, J.J. Huselstein, and T. Martire, "High power very low voltage motor for electric vehicle". In New Perspectives on Electric Vehicles; IntechOpen London, UK, 2020.
- [4] P. Enrici, N. Boubaker, D. Matt, « Bar Winding for the Low-Voltage Motorization of an Electric Tractor », International Conference on Electrical Machines (ICEM 2020), Gothenburg, Sweden, 2020. DOI: 10.1109/ICEM49940.2020.9270906.
- [5] N. Boubaker, "Étude des pertes atypiques dans les machines synchrones à aimants à hautes performances pour applications aéronautiques", Thèse de doctorat, IES-GEM, Université de Montpellier, 2016
- [6] P. Enrici, J. Jac, N. Ziegler, F. Dumas, D. Matt. "Actuators with Toothed Coupling for the Electrification of a landing gear", IET Electric Power Applications, 2018.
- [7] N. Bekka. "Modélisation et optimisation d'actionneurs rotatifs fort couple pour système embarqués » Thèse de doctorat, IREENA., Univ. Nantes, 2015.
- [8] N. Bianchi, G. Berardi, "Analytical Approach to Design Hairpin Windings in High Performance Electric Vehicle Motors, " Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Portland, Oregon, USA, 2018
- [9] M. Aitakkache, "Etude, conception et optimisation de motorisations nautiques électriques innovantes.", Thèse de doctorat, IES-GEMS, Université de Montpellier, 2023
- [10] M. Aitakkache, P. Enrici, D. Matt, N. Boubaker, and L. Piscini, "Concept, Feasibility of Cylindrical Bar Winding for Low Voltage Permanent Magnet Synchronous Motor," Energies, vol. 15, no. 4, p. 1507, Feb. 2022, doi: 10.3390/en15041507
- [11] J. Le Besnerais, P. Pellerey, V. Lanfranchi et autres, « Bruit acoustique d'origine magnétique dans les machines synchrones, » dans Machines électriques tournantes : conception, construction et commande, Editions T.I., d3581,2016,