

# Dimensionnement d'une machine pure synchro-reluctante à pôles asymétriques pour la haute vitesse

Antoine APPLAGNAT-TARTET, Misa MILOSAVLJEVIC

IFP Energies Nouvelles, Institut Carnot IFPEN Transports Energie, 1 Av. de Bois-Préau, 92852 Reuil-Malmaison, France

**RESUME** – Dans cet article, les auteurs décrivent les choix stratégiques opérés pour concevoir une machine synchrone à réluctance pure (Pure-SynRel) sans aimants, recyclable, et dotée de pôles asymétriques, conçue pour fonctionner à une vitesse maximale d'environ 21 000 tr/min, spécifiquement adaptée aux applications automobiles. L'étude se concentre sur l'identification des leviers de conception et sur l'optimisation du circuit magnétique afin de résoudre trois problématiques majeures inhérentes à cette topologie qui freinent son adoption en tant que machine de traction automobile : l'augmentation du facteur de puissance pour réduire la taille et le coût de l'onduleur ; la diminution des sources de bruit/vibrations (NVH) ainsi que des ondulations de couple ; et enfin, l'amélioration du rendement afin de réduire l'écart de performance avec les technologies utilisant des aimants permanents (PMaSynRel). Le dimensionnement des éléments statoriques dont le choix du type de bobinage (concentrés ou distribués, à pas entier ou fractionnaire etc.) ainsi que les éléments rotoriques (nombre de paires de pôles, forme et nombre des barrières de flux etc.) sont analysés. Une première version de la machine, dotée de pôles symétriques, présentait des ondulations de couple de 24 %, excédant les seuils acceptables pour une application automobile. À partir de cette conception initiale, un rotor avec des pôles asymétriques a été développé, permettant une réduction des ondulations de couple de 56 % et limitant la perte de couple à 6 %. La machine finale atteint un couple maximal de 172 N·m (2500N.m à la roue) et une puissance de 220 kW. À pleine puissance, les ondulations de couple et le facteur de puissance sont respectivement de 14 % et 0,64 avec un rendement pic de 96,6%. Un prototype est en cours de fabrication et sera testé sur les bancs d'essai IFPEN en 2025 afin de valider les performances théoriques, les résultats feront l'objet d'une publication ultérieure.

**Mots-clés**—Machines électriques, Pure synchro-reluctante, Véhicule électrique, Rotor asymétrique, Machaon

## 1. INTRODUCTION

Dans le domaine du transport électrique, les machines de traction reposent majoritairement sur des technologies à base d'aimants permanents, notamment les machines synchrones à réluctance assistée par aimants permanents (PMaSynRel). Ces systèmes exploitent des terres rares lourdes, telles que le dysprosium et le terbium, ainsi que des terres rares légères comme le néodyme et le lanthane, dont la volatilité des coûts et l'incertitude d'approvisionnement constituent une problématique économique persistante. Une alternative prometteuse réside dans les machines purement synchrones à réluctance (Pure SynRel), qui se distinguent par leur compétitivité économique face à d'autres solutions, telles que les machines asynchrones ou les machines synchrones à excitation électrique. Ces dispositifs présentent également des avantages en termes de simplicité de fabrication et de recyclabilité dans les infrastructures existantes. Toutefois, l'absence d'aimants

permanent influe négativement sur leurs performances, entraînant une diminution du facteur de puissance et du rendement, ainsi qu'une augmentation notable des ondulations de couple.

Cet article détaille les choix stratégiques de dimensionnement entrepris pour concevoir une machine Pure SynRel répondant à un cahier des charges automobile. L'objectif affiché est la maximisation du facteur de puissance, du rendement et la minimisation des ondulations de couple, les points faibles de cette topologie. La méthodologie d'optimisation est dévoilée ainsi que l'analyse des éléments constitutifs du stator et du rotor et les choix de dimensionnement faits ayant permis la conception d'une machine symétrique à 4 pôles et 4 barrières de flux par pôles. Sur cette base, un rotor asymétrique a été élaboré pour atténuer les ondulations de couple tout en préservant les performances intrinsèques du rotor symétrique. Enfin, l'article précise les ajustements mécaniques effectués ainsi que leur impact sur les performances électromagnétiques, aboutissant à la réalisation d'un prototype en 2025.

### 1.1. Cahier des charges techniques

L'application cible est spécifiquement conçue pour les véhicules électriques des segments B premium et C, caractérisés par un couple à la roue d'environ 2 500 N·m et une vitesse maximale du véhicule avoisinant les 190 km/h. Pour répondre à ces exigences, les spécifications techniques énoncées dans la Table 1 doivent être strictement respectées.

Table 1 : Cahier des charges techniques

|                                |        |         |
|--------------------------------|--------|---------|
| Régime max                     | tr/min | >20,000 |
| Couple max                     | N.m    | > 170   |
| Puissance maximal              | kW     | > 200   |
| Puissance @ 21,000 tr/min      | kW     | > 100   |
| Rendement pic                  | -      | > 96%   |
| Facteur de puissance à la Pmax | -      | > 0.6   |
| Ondulation de couple au Cmax   | -      | < 15%   |

Les différentes géométries présentées dans cet article seront comparées sur la base de ce cahier des charges. De plus, le rapport de saillance  $L_q/L_d$  et la différence  $L_d - L_q$ , intervenants dans le calcul du facteur de puissance et du couple électromagnétique (équation 1 et équation 2) seront ajoutés, de même que les densités massiques de performances.

$$T_e = \frac{3}{2} p [(L_d - L_q) i_d i_q] \quad (1)$$

$$\cos \phi = \frac{\frac{L_d}{L_q} - 1}{\frac{L_d}{L_q} + 1}; \quad (2)$$

Avec  $p$  le nombre de paires de pôles,  $i_d$  et  $i_q$  les courants dans l'axe d-q. Enfin, les ondulations de couple sont calculées sur le point de couple max. et sur une période de 360°E. Bien que les standards dans le domaine de l'automobile soient de l'ordre de 5% d'ondulation évalués au couple maximal. La phase d'optimisation a nécessité une extension temporaire de ce seuil à 15 %, permettant ainsi une exploration plus large et une convergence accrue grâce à des degrés de liberté supplémentaires. Pour les travaux ultérieurs, le seuil nominal de 5 % sera rigoureusement appliqué dans le cadre d'optimisations spécifiques.

## 2. METHODOLOGIE D'OPTIMISATION

### 2.1. Méthodologie générale

La stratégie technologique pour satisfaire ces exigences repose sur deux axes principaux : l'utilisation d'une source d'énergie fonctionnant à haute tension (750 V DC), ainsi que la diminution des besoins en couple moteur, tout en conservant le couple requis à la roue, par l'accroissement de la vitesse maximale (> 20 000 tr/min). L'augmentation en régime accroissant les pertes mécaniques et pertes fers, les processus d'optimisation doivent viser un compromis optimal entre le couple, la vitesse maximale et le rendement. L'étude actuelle s'attache exclusivement à répondre aux exigences spécifiées via la conception électromagnétique, sans se préoccuper d'améliorations liées aux matériaux utilisés ou aux stratégies de pilotages avancés.

Les optimisations utilisées dans cette recherche sont paramétriques. La Table 2 montre les paramètres libres et fixes employés dans toutes les optimisations effectuées. Pour un rotor symétrique à 4 pôles avec 4 barrières fluides par pôle, on dénombre 11 paramètres d'optimisation (9 au rotor et 2 au stator). Le choix de ces paramètres repose sur leur influence sur les performances ciblées, tels que décrites en Table 1. Les aspects mécaniques, tels que les rayons de congé ou l'épaisseur des ponts tangentiels et radiaux, ont été traités dans une évaluation dédiée mais ne seront pas explicités en détails dans cet article.

| Paramètres d'optimisation                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Paramètres fixes                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Au rotor (barrières suivant les équations de Zhukovski) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Epaisseur et ouverture de la barrière 1</li> <li>• Epaisseur et ouverture de la barrière 2</li> <li>• Epaisseur et ouverture de la barrière 3</li> <li>• Epaisseur et ouverture de la barrière 4</li> </ul> <p>Au stator :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Rayon du rotor</li> <li>• Hauteur et largeur d'encoche</li> </ul> | <p>Commun à toutes les optimisations :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diamètre extérieur : 180 mm</li> <li>• Longueur active : 175 mm</li> <li>• Entrefer : 0.60 mm</li> <li>• Epaisseur des ponts radiaux/tangentiels : 0.65 mm</li> <li>• Courant AC max : 400 Arms</li> </ul> |

Table 2 : Définition générale du problème

Deux approches d'optimisation ont été employées dans cette étude et seront détaillées dans les sections suivantes.

### 2.2. Optimisation indirecte

La première méthode d'optimisation est mono-physique s'appuyant sur des méta-modèles. La construction de ces méta-modèles repose sur un plan d'expérience échantillonné en hypercube latin, comprenant environ 100 points par paramètre d'optimisation. Les performances sont évaluées à l'aide de simulations FEA 2D grâce aux logiciels FEMM/XFEMM, tandis que les surfaces de réponse sont générées par une interpolation de Krigeage. Des optimisations mono-objectif et multi-objectifs, intégrant ou non des contraintes, ont été menées. Une description détaillée de cette méthodologie d'optimisation est présentée dans [1], elle sera appelée « Méthodologie Indirecte » dans la suite de ce papier.

Cette méthode permet une évaluation rapide des performances et a permis d'optimiser le facteur de puissance, le rendement, le couple et la puissance. Cependant, concernant l'optimisation des ondulations de couple, l'atteinte des objectifs s'avère plus complexe avec cette méthode. Cela s'explique par la forte sensibilité de ce phénomène à des variations minimales des paramètres et à la difficile modélisation via des surfaces de réponses qui en découle.

### 2.3. Optimisation par essais de particules (PSO)

Pour surmonter les limitations identifiées avec la méthodologie indirecte, une seconde approche d'optimisation a été mise en œuvre : l'optimisation directe par essaim de particules (PSO). Cette méthode repose sur la définition d'un nombre de particules, d'itérations et de paramètres d'optimisation associés à chaque particule. L'algorithme explore des variations des paramètres et analyse leur contribution à la convergence de l'essaim vers les objectifs établis, à savoir la réduction des ondulations de couple et la maximisation du facteur de puissance. Cette optimisation est mono-physique et bi-objectifs.

## 3. OPTIMISATION DU STATOR

Dans cette section, l'influence du type de bobinage et de la géométrie du stator sur les performances d'une machine à réluctance synchrone pure (PureSynRel) est examinée. Dans un premier temps, l'impact d'un bobinage concentré est évalué, suivi d'un bobinage distribué simple couche. Enfin un bobinage double couche à pas fractionnaire est évoqué sans être abordé en détail dans cet article.

### 3.1. Bobinage concentré

#### 3.1.1. Optimisation

Un bobinage concentré (ou bobinage sur dent) présente des atouts significatifs, notamment une simplicité structurelle, un facteur de remplissage élevé réduisant les pertes joules, ainsi qu'un gain en compacité dû à la diminution de la longueur des têtes de bobines.

On trouve dans la littérature des recommandations de préconception telles que dans [2] où l'auteur préconise de réduire le nombre de pôles, pour augmenter le couple moyen. De plus, la grande quantité de fer dans ces machines, comparée aux PMaSynRel (longueur et diamètre supérieurs pour compenser l'absence d'aimants), implique que les fréquences électriques doivent être réduites pour limiter les pertes fer. Pour cela, nous avons choisi d'étudier uniquement des conceptions avec 4 ou 8 pôles, pour lesquelles la fréquence électrique reste acceptable, même au-delà de 20 000 tr/min. Dans [3], les auteurs identifient les combinaisons optimales pôles/encoches pour des machines à bobinage concentrés. Il est montré dans [2] que les machines à bobinage concentré produisent moins de couple réluctant que

leur équivalent en bobinage distribué, du fait de l'importante largeur des ouvertures d'encoches.

Sur la base de l'analyse de la littérature présentée, la combinaison 8 pôles/12 encoches a été sélectionnée et optimisée en utilisant la méthodologie indirecte. Le nombre de barrières de flux a été fixé à 2 par pôle et le facteur de remplissage à 60 %. Les objectifs étaient de maximiser le facteur de puissance à la puissance maximale et de maximiser le couple, tout en respectant les spécifications précédemment définies. L'optimisation indirecte est utilisée.

3.1.2. Résultats

La géométrie offrant les meilleures performances est illustrée dans la Figure 1, et dans la Table 3

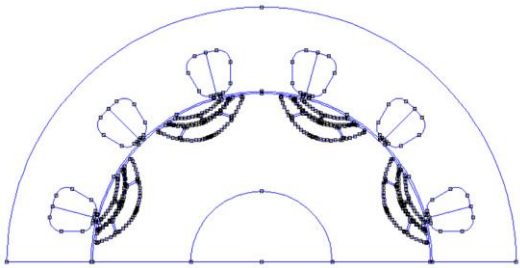


Figure 1 : Géométrie optimisée à 12 encoches/8 pôles, bobinage concentré

|                                       | 4 PP / 2 BAR / CONC |
|---------------------------------------|---------------------|
| Couple [N.m]                          | 175                 |
| Puissance max. [kW]                   | 165                 |
| Puissance max. à 20 000tr/min [kW]    | 10                  |
| Facteur de puissance à la Pmax [-]    | 0.30                |
| Rendement pic [%]                     | 93.5                |
| Ondulation de couple à Cmax [%]       | 88.0                |
| Ld/Lq [-]                             | 1.84                |
| Ld – Lq [µH]                          | 116                 |
| Densité de puissance massique [kW/kg] | 5,5                 |

Table 3 : Performances pour la géométrie optimisée à 12 encoches/8 pôles, bobinage concentré

En raison des écarts significatifs par rapport aux spécifications (facteur de puissance, puissance maximale, vitesse, rendement, ondulation de couple), cette technologie n'a pas été optimisée davantage. Les résultats confirment l'inadéquation de ce type d'enroulement aux machines purement synchrone-reluctantes, notamment pour des exigences à haute vitesse.

3.2. Bobinage distribué - simple couche

Les avantages d'un enroulement distribué à simple couche ont été analysés. Les configurations adaptées aux rotors 4/8 pôles sont : 24, 36 ou 48 encoches. Au-delà, l'épaisseur des dents devient trop faible, contraignant la découpe industrielle. Le choix s'est basé sur l'analyse du facteur de bobinage et des harmoniques de la force magnétomotrice (Table 4, Figure 2).

| Nombre d'encoches   | 24    | 36    | 48    |
|---------------------|-------|-------|-------|
| Facteur de bobinage | 0.966 | 0.960 | 0.958 |

Table 4 : Facteur de bobinage selon le nombre d'encoches

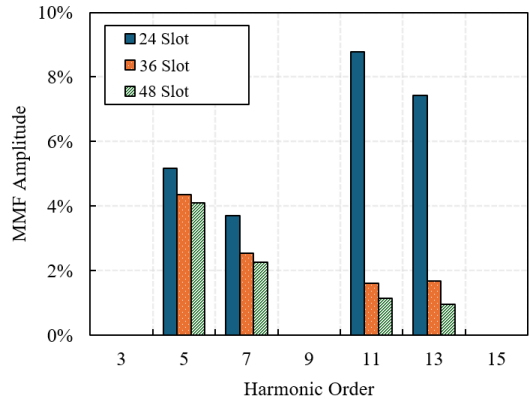


Figure 2 : Harmonique de la MMF pour des bobinages distribués à 24, 36 et 48 encoches

Le facteur de bobinage, défini comme le rapport du flux capté par le bobinage réel sur le flux qui serait capté par un bobinage virtuel à pas polaire diamétral et à une encoche par pôle et phase, influence directement le couple d'une machine électrique. Maximiser ce facteur est donc crucial. Les harmoniques de MMF doivent être minimisées pour atténuer les harmoniques de flux dans l'entrefer, sources de pertes fer et d'ondulations de couple. Parmi les configurations étudiées, le stator à 48 encoches représente le meilleur compromis entre ces critères. Le rotor sera développé basé sur cette topologie de stator.

3.3. Bobinage distribué – double couche

Un stator à bobinage distribué double couche et à pas fractionnaire a été optimisé pour minimiser les oscillations de couple. Associé au rotor optimisé présenté dans cet article, il réduit ces oscillations à 4,5 % au couple maximal. Ce sujet sera approfondi dans une publication ultérieure.

4. CONCEPTION D'UN ROTOR A POLES SYMETRIQUES

Une fois le stator défini, l'optimisation du rotor a été abordée. Pour limiter les optimisations et réduire le temps de calcul, une machine à pôles symétriques a d'abord été conçue afin de maximiser le facteur de puissance et le couple.

Les objectifs, contraintes et paramètres des optimisations sont présentés ci-après.

|                            |                                                                                                                                                                        |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Objectifs/Contraintes      | <ul style="list-style-type: none"><li>Maximiser le facteur de puissance</li><li>Maximiser le couple</li><li>Respect du cahier des charges définis en Table 1</li></ul> |
| Paramètres fixés           | <ul style="list-style-type: none"><li>Nombre de pôles : 4 ou 8</li><li>Nombre d'encoches : 48</li><li>Facteur de remplissage : 44%</li><li>Voir Table 2</li></ul>      |
| Paramètres d'optimisations | <ul style="list-style-type: none"><li>Voir Table 2</li></ul>                                                                                                           |

Table 5 : Définition du problème pour l'optimisation de la machine à pôles symétriques

4.1. Choix du nombre de pôles et de barrières

Comme mentionné précédemment, seules les configurations à 4 et 8 pôles ont été étudiées. En l'absence d'aimants permanents pour générer le couple, l'optimisation du nombre, de la géométrie et de la position des barrières de flux est cruciale pour maximiser les performances d'une PureSynRel. Selon [4], la relation  $n_s = n_r \pm 4$  est recommandée, où  $n_s$  désigne le nombre de dents et  $n_r$  le nombre d'encoches équivalentes dans le rotor. Par ailleurs, le nombre de barrières doit respecter la relation en

équation 3. Ainsi, en suivant ces deux recommandations, il faudrait 5 à 6 barrières pour un rotor à 4 pôles et 3 barrières pour un rotor à 8 pôles.

$$N_{barriers} < SPP \times \frac{3}{2} \tag{3}$$

Concernant le rotor à 4 pôles, le faible diamètre du rotor (environ 110 mm dans les géométries finales) limite l'intégration de 5 ou 6 barrières par pôle. Deux configurations ont été considérées et optimisées : un rotor à 3 barrières et un autre à 4 barrières par pôle. Concernant le rotor à 8 pôles, une géométrie à 3 barrières de flux a été optimisée. Les géométries optimisées et les performances associées sont présentées en Figure 3 et Table 6.

#### 4.2. Résultats

|                                       | 4P / 3 BAR | 4P / 4 BAR | 8P / 3 BAR |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|
| Couple [N.m]                          | 168        | 184        | 209        |
| Puissance max. [kW]                   | 221        | 231        | 190        |
| Puissance max. à 20 000tr/min [kW]    | 134        | 134        | 70         |
| Facteur de puissance à la Pmax [-]    | 0.65       | 0.65       | 0.61       |
| Rendement pic [%]                     | 96.0       | 96.1       | 95.8       |
| Ondulation de couple à Cmax [%]       | 15.0       | 24.5       | 16.0       |
| Ld/Lq [-]                             | 4.65       | 4.65       | 4.18       |
| Ld – Lq [μH]                          | 534        | 567        | 349        |
| Densité de puissance massique [kW/kg] | 8          | 8.1        | 6.9        |

Table 6 : Indicateurs de performances pour les machines 4 pôles/3 barrières (4P/3BAR); 4 pôles/4 barrières (4P/4BAR) et 8 pôles/3 barrières (8P/3BAR)

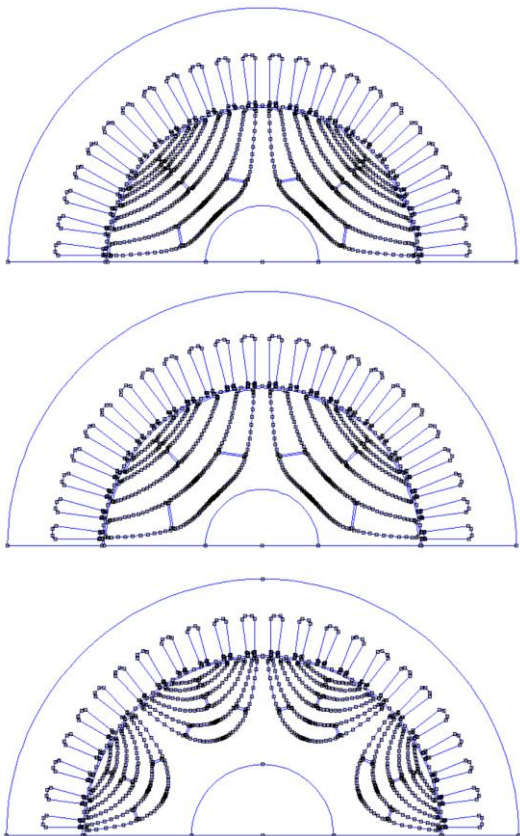


Figure 3 : Géométries optimisées pour les machines 4P/4BAR (en haut); 4P/3BAR (au milieu) et 8P/3BAR (en bas)

##### 4.2.1. Analyse machine 4 pôles

Dans les géométries finales, les barrières de flux se trouvent très proche de l'axe du rotor. Pour limiter les risques d'affaiblissement mécanique, une condition d'espacement de 7mm entre l'axe du rotor et la barrière la plus proche a été ajoutée. D'un point de vue électromagnétique, ces résultats sont cohérents, dans [5] l'auteur établit une corrélation entre la proximité des barrières de flux avec l'arbre et l'augmentation du rapport de saillance. Cependant, un espacement trop faible entre deux barrières diminue ce rapport, du fait de la saturation magnétique.

Les deux géométries respectent le cahier des charges en termes de puissance, rendement et facteur de puissance. Toutefois, la configuration 4P/3BAR n'atteint pas le couple maximal requis. L'ajout d'une 4e barrière augmente le couple de 9,5 % et la puissance maximale de 4,5 %. Le facteur de puissance atteint 0,65 au couple maximal, à noter que pour des courants plus faibles, le facteur de puissance atteint jusqu'à 0,73, témoignant d'une amélioration à des conditions de fonctionnement moins exigeantes.

Ces résultats sont corroborés par les mesures des inductances Ld et Lq, du rapport de saillance Ld/Lq et de la différence Ld – Lq. Enfin, l'écart de couple peut aussi s'expliquer par le ratio air-fer  $K_w$ , défini dans [6]. Ce critère évalue la proportion de fer et d'air le long de l'axe q de la machine, avec un couple maximal atteint pour  $K_w \approx 1$ . Ici,  $K_w$  vaut 0,90 pour la machine à 4 barrières et 1,32 pour celle à 3 barrières. Dans cette dernière, un excès d'air par rapport au fer induit une sur-saturation des tôles, réduisant le couple.

La machine 4P/4BAR présente des ondulations de couple supérieures à la limite de 15 %. Toutefois, à ce stade, l'optimisation privilégie les performances globales (facteur de puissance, couple, puissance, rendement) sans inclure cet aspect, qui sera traité ultérieurement.

##### 4.2.2. Analyse machine 8 pôles

Dans nos optimisations, le diamètre du rotor est variable. Le rotor à 8 pôles présente un rayon optimal de 63 mm, soit 13 % supérieur à celui du rotor à 4 pôles (56 mm). Pour un diamètre extérieur constant, la culasse du stator des machines à 4 pôles est élargie afin de limiter la saturation magnétique. Cette différence dimensionnelle contribue au couple supérieur des rotors à 8 pôles. Malgré cela, la puissance maximale et le facteur de puissance restent inférieurs à celui des machines à 4 pôles.

##### 4.2.3. Conclusion

Du point de vue du respect du cahier des charges, la machine 4P/4 BAR est la plus performante. Les ondulations de couple restent à améliorer dans une optimisation dédiée. Ce rotor servira de référence pour la conception d'un pôle asymétrique présenté dans la suite des travaux.

### 5. CONCEPTION D'UN ROTOR A POLES ASYMETRIQUES

#### 5.1. Méthodologie

Plusieurs approches permettent de réduire les ondulations de couple dans une machine synchrone. Par exemple, [7] propose d'ajouter des découpes au rotor, tandis que [8] suggère l'ajout de barrières de flux auxiliaires. Dans cette étude, une solution asymétrique, dite "Machaon", a été retenue. Les auteurs de [9] introduisent une asymétrie en jouant sur l'angle d'ouverture des barrières de flux, réduisant les ondulations de couple de 44% sans affecter significativement le couple moyen.

Dans notre cas, l'asymétrie repose sur le nombre de barrières de flux dans 2 pôles adjacents. À l'aide de l'algorithme d'essai

de particules, un pôle à 3 barrières a été optimisé pour réduire les ondulations de couple, l'autre pôle est fixé et identique à celui de la machine 4P/4BAR. Chaque pôle occupe 90°. Cette solution simplifie également l'assemblage en production de série comparée à du skewing. Les objectifs, contraintes et paramètres de l'optimisation sont présentés dans la Table 7.

|                            |                                                                                                                                                                                                                                 |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Objectifs                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Minimiser les ondulations de couple au Cmax</li> <li>Maximiser le facteur de puissance à la Pmax</li> <li>Respect du cahier des charges définis en Table 1</li> </ul>                    |
| Paramètres fixés           | <ul style="list-style-type: none"> <li>Paramètres du stator</li> <li>Pole n°1 (4 barrières)</li> <li>Voir Table 2</li> </ul>                                                                                                    |
| Paramètres d'optimisations | <ul style="list-style-type: none"> <li>Epaisseur et ouverture de la barrière 1 du pôle n°2</li> <li>Epaisseur et ouverture de la barrière 2 du pôle n°2</li> <li>Epaisseur et ouverture de la barrière 3 du pôle n°2</li> </ul> |

Table 7 : Définition du problème pour l'optimisation de la machine Machaon

### 5.2. Résultats et analyse

La géométrie présentant les meilleures performances est présentée en Figure 4 et Table 8 :

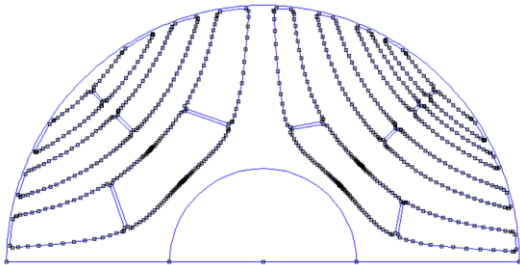


Figure 4 : Machine optimisée 4 pôles - architecture Machaon

|                                       | 4P / 4 BAR<br>(REF) | 4P / MACHAON |
|---------------------------------------|---------------------|--------------|
| Couple [N.m]                          | 184                 | 173          |
| Puissance max. [kW]                   | 231                 | 225          |
| Puissance max. à 20 000tr/min [kW]    | 134                 | 127          |
| Facteur de puissance à la Pmax [-]    | 0.65                | 0.65         |
| Rendement pic [%]                     | 96.1                | 96           |
| Ondulation de couple à Cmax [%]       | 24.5                | 10.0         |
| Ld/Lq [-]                             | 4.65                | 4.63         |
| Ld – Lq [μH]                          | 567                 | 547          |
| Densité de puissance massique [kW/kg] | 8.1                 | 8.1          |

Table 8 : Indicateurs de performances pour les machines 4 pôles/4 barrières (4P/4BAR) et 4 pôles - architecture Machaon (4P/MACHAON)

La Figure 5 compare le couple et les ondulations de couple entre 4P/4BAR (considéré comme la référence) et la version Machaon. La conception du pôle asymétrique a permis la réduction de 58% des ondulations de couple tandis que le couple max. a chuté de 6% et de 2.6% pour la puissance max. Le facteur de puissance est conservé, validant l'approche Machaon pour réduire les ondulations de couple avec un impact limité sur les performances.

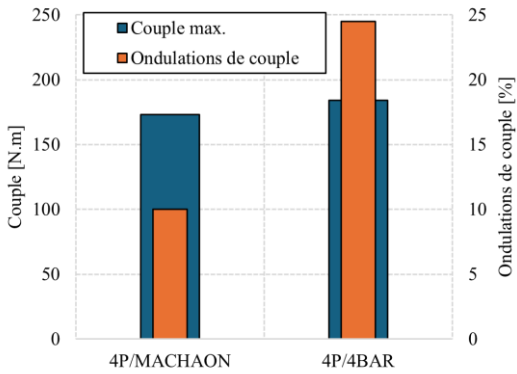


Figure 5 : Couple et ondulations de couple pour la machine 4P/4BAR (à droite) et 4P/MACHAON (à gauche)

La Figure 6 montre le contenu harmonique du couple de la machine 4P/4BAR et 4P/MACHAON. On constate une nette réduction des ondulations de couple grâce à l'ajout de barrières asymétriques, diminuant fortement les harmoniques 18 et 24, réduits respectivement de 75 % et 55 %.

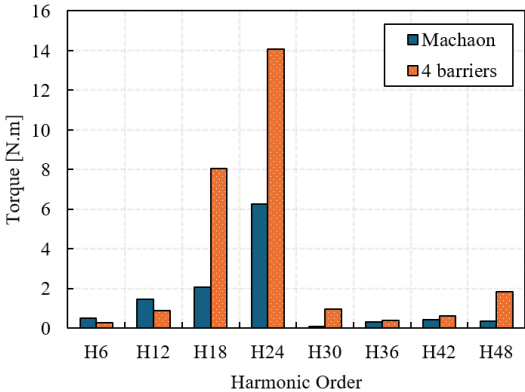


Figure 6 : Décomposition harmonique du couple max. En bleu : design Machaon ; en rouge : design à pôles symétriques

La Figure 7 montre la composante radiale de l'induction dans l'entrefer au courant max avec un angle de charge de 20°E. On constate l'asymétrie de pôles entre les angles 90°M et 180°M puis entre 270°M et 360°M.

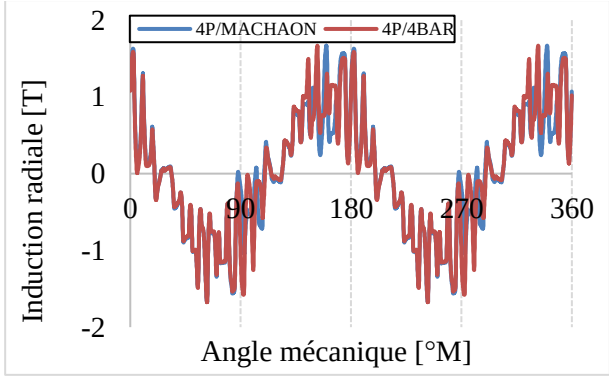


Figure 7 : Composante radiale de l'induction dans l'entrer. En bleu : design Machaon ; en rouge : design à pôles symétriques

## 6. EVALUATION MECANIQUE ET IMPACT SUR LES PERFORMANCES

Suite à l'optimisation électromagnétique, une évaluation mécanique a été effectué pour assurer la tenue mécanique jusqu'à >20 000 tr/min. Les ponts radiaux et tangentiels ont été augmentés de 0.65mm à 0.80mm ce qui a réduit le couple et la puissance de 5% ainsi que le facteur de puissance de 0.3 points. Les rayons de congés ont été augmentés entraînant une élévation



des ondulations de couple de 10% à 14%. Pour compenser ces pertes, le diamètre extérieur a été augmenté à 190mm, augmentant l'épaisseur de culasse de 5mm et désaturant celle-ci. Cette modification a permis de regagner couple, puissance et rendement, en contrepartie, la masse de la machine a augmenté de 3.5kgs.

La machine finale atteint un couple de 172 N·m à 400 Arms, une puissance de 220 kW sous 750 V DC, un facteur de puissance de 0,64 au maximum de puissance, des ondulations de couple de 14 % au couple maximal, un rendement pic de 96,6 % et une vitesse de pointe de 20 800 tr/min. La cartographie de rendement finale est illustrée en Figure 8.

La plage de puissance répond aux exigences du secteur automobile grâce à une large zone de puissance constante et une diminution de 16 % de la puissance à haut régime (150 → 125 kW). De plus, le véhicule bénéficie d'un boost de puissance supérieur à 175 kW entre 10 000 et 15 000 tr/min.

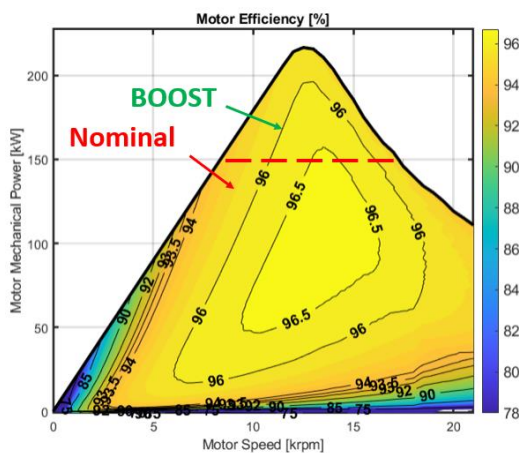


Figure 8 : Cartographie de rendement de la géométrie finale

## 7. CONCLUSION

Cet article explore la conception d'une machine synchrone à réluctance pure avec pôles asymétriques, destinée aux segments automobiles B et C. La machine atteint une vitesse maximale de 20 800 tr/min, un couple de 172 N·m à 400 Arms, une puissance de 220 kW, un facteur de puissance de 0,64 à puissance maximale, un rendement pic de 96.6% et des ondulations de couple de 14 % au couple maximal.

Une étude comparative initiale de différentes architectures de stators et configurations de bobinage a montré que le stator à 48 encoches avec un bobinage distribué simple couche était le plus adapté. Ensuite, l'analyse d'architectures de rotors à 4 et 8 pôles, avec 3 ou 4 barrières de flux par pôle, a conduit à choisir une machine à pôles symétriques offrant des performances maximales. Cependant, les ondulations de couple atteignaient 24 % du couple maximal. Pour y remédier, une asymétrie a été introduite en concevant un pôle adjacent avec un nombre différent de barrières de flux. Cela a réduit les ondulations de couple de 56 %, au prix d'une baisse de 6 % du couple et de 2,6 % de la puissance.

Pour assurer la robustesse mécanique, des ajustements de la géométrie du rotor ont été effectués, impactant les performances électromagnétiques mais préservant l'intégrité mécanique à

haute vitesse. Cette démarche souligne les compromis électromécaniques des machines synchrones à réluctance pure, nécessitant une optimisation intégrée de la géométrie.

Les performances obtenues montrent qu'une machine synchrone à réluctance pure peut être optimisée pour un cahier des charges de type automobile, surmontant ses défauts de rendements et ses sources de NVH dans un design compact, avec un onduleur de taille réduite. Ces performances exploitent deux leviers principaux : une source de 750 V DC et une vitesse élevée. Elles pourraient encore s'améliorer via des matériaux ferromagnétiques à faibles pertes (NO27 ou NO25 au lieu du M250-35A), des enroulements hairpin et des algorithmes de contrôle avancés qui n'ont pas été considérés ici. Un objectif futur sera de réduire les ondulations de couple sous 5 % au couple maximal grâce à une optimisation du stator et du type de bobinage.

Le prototype final est en cours de réalisation et sera testé sur banc électrique à l'été 2025, avec des résultats attendus pour un futur article.

## 8. REFERENCES

- [1] Cisse, Koua & Nasr, Andre & Chareyron, Baptiste & Abdenour, Abdelli & Milosavljevic, Micha. (2022). Surrogate Model-Based Optimization Methodology for High Torque and Power Density Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor. 295-301. 10.1109/ICEM51905.2022.9910703.
- [2] F. P. Pop, R. Marțiș, A. Dărămuș, C. Marțiș, A. -C. Pop and I. Vintiloiu, "Design and analysis of slot-pole combination for synchronous reluctance machine with concentrated windings for automotive applications," 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE), Iasi, Romania, 2016, pp. 229-234, doi: 10.1109/ICEPE.2016.7781338
- [3] Lehner, Bastian & Gerling, Dieter. (2016). Design and comparison of concentrated and distributed winding synchronous reluctance machines. 1-8. 10.1109/ECCE.2016.7855004.
- [4] A. Vagati, "Synchronous Reluctance Electrical Motor Having a Low Torque Ripple Design", USA patent No. 5,818,140, Oct. 6, 1998.
- [5] T. Mohanarajah, A. Hellany, J. Rizk and M. Nagrial, "Analysis and design of high-performance synchronous reluctance machine," 2018 IEEE 12th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG 2018), Doha, Qatar, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/CPE.2018.8372490
- [6] K. Khan, M. Leksell and O. Wallmark, "Design aspects on magnet placement in permanent-magnet assisted synchronous reluctance machines," 5th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2010), Brighton, UK, 2010, pp. 1-5, doi: 10.1049/cp.2010.0203
- [7] A. Carlsson, V. Josefsson, J. Fagerberg, K. Ahlgren, C. Sandström and G. Puccio, "Parametric Optimization of Flux Barriers for Torque Ripple and Tooth Force Minimization in Permanent Magnet Synchronous Machines," 2024 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Torino, Italy, 2024, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICEM60801.2024.10700202.
- [8] R. Rouhani, S. E. Abdollahi and S. A. Gholamian, "Torque ripple reduction of a synchronous reluctance motor for electric vehicle applications," 2018 9th Annual Power Electronics, Drives Systems and Technologies Conference (PEDSTC), Tehran, Iran, 2018, pp. 386-391, doi: 10.1109/PEDSTC.2018.8343828
- [9] C. Gallardo, J. A. Tapia, M. Degano, H. Mahmoud and A. E. Hoffer, "Rotor Asymmetry Impact on Synchronous Reluctance Machines Performance," 2022 International Conference on Electrical Machines (ICEM), Valencia, Spain, 2022, pp. 848-854, doi: 10.1109/ICEM51905.2022.9910665