



**HAL**  
open science

## Amélioration des performances d'une machine asynchrone par le remplacement des tôles magnétiques

François Balavoine, Cassoret Bertrand, Cristian Demian, Raphael Romary,  
Christophe Debendere

### ► To cite this version:

François Balavoine, Cassoret Bertrand, Cristian Demian, Raphael Romary, Christophe Debendere. Amélioration des performances d'une machine asynchrone par le remplacement des tôles magnétiques. CONFÉRENCE DES JEUNES CHERCHEURS EN GÉNIE ELECTRIQUE (JCGE), Université d'Artois LSEE, May 2017, ARRAS, France. hal-04287463

**HAL Id: hal-04287463**

**<https://univ-artois.hal.science/hal-04287463>**

Submitted on 15 Nov 2023

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Amélioration des performances d'une machine asynchrone par le remplacement des tôles magnétiques.

François BALAVOINE <sup>(1)(2)</sup>, Bertrand CASSORET <sup>(1)</sup>, Cristian DEMIAN <sup>(1)</sup>, Raphael ROMARY <sup>(1)</sup>,  
Christophe DEBENDERE <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Univ. Artois, EA 4025, Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE), Béthune, F-62400, France, <sup>(2)</sup> Flipo Richir Zone Industrielle A 13 rue de Lorival 59473 Seclin France

*francois\_balavoine@ens.univ-artois.fr*

**RÉSUMÉ** – Cet article présente une étude préliminaire qui met en évidence l'intérêt du remplacement du circuit magnétique des machines tournantes de moyenne puissance. Le but est de montrer l'utilité de rénover des machines asynchrones anciennes plutôt que de les remplacer par des neuves. L'étude portera sur une présentation de l'impact d'une modification des tôles sur le rendement de la machine, à partir de modèle simple pour calculer les pertes.

**ABSTRACT** – This paper presents the preliminary study that highlights the interest of replacing the magnetic circuit of a medium power range induction motor. The aim is to show the usefulness to renovate an old asynchronous motor, rather to replace it by a new one. The study will focus on the impact of modifications of the electrical sheets of the circuit in order to increase the efficiency. We use a simple model to calculate the iron losses.

**MOTS-CLÉS** –Rendement, impact environnemental, redimensionnement, pertes fer, tôles magnétiques, machines asynchrones.

## 1. Introduction

De nombreuses installations électriques (pompage de distribution d'eau, vieilles usines...) utilisent des machines tournantes de plus de 50 ans. Le remplacement d'une machine ancienne par une neuve peut avoir un impact environnemental plus important comme le montrent les études d'Analyse du Cycle de Vie [1]. La masse d'un moteur asynchrone comprend essentiellement de l'acier, dont 45% compose la carcasse métallique [2]. Une rénovation permet de ne pas consommer d'énergie ni de minerai supplémentaire d'une part pour le recyclage de celle-ci et d'autre part pour la création d'une nouvelle carcasse.

Les stratégies de recherche seront exposées pour permettre de comprendre l'importance d'une rénovation de machine, puis les possibilités qui s'offrent à nous pour l'améliorer. Nous allons présenter les variables qu'il est possible de modifier pour obtenir selon le type de machine, asynchrone ou synchrone, une réduction des pertes ou une augmentation de la puissance mécanique sur l'arbre.

Nous allons dans cet article considérer le cas d'une machine asynchrone, et quantifier l'impact d'un simple changement de tôles sur le rendement. Des caractéristiques de tôles de 1960 vont permettre d'avoir un premier point de comparaison avec des tôles récentes. Cette modification va permettre de favoriser la perméabilité des tôles, et d'augmenter l'induction maximale admissible.

En conclusion, des perspectives de travail seront présentées pour permettre de faire évoluer nos recherches sur le redimensionnement des machines pendant les trois années de thèse.

## 2. Les stratégies de redimensionnement

Les avantages de la rénovation par rapport au remplacement par du neuf sont : la possibilité d'une amélioration des performances, une rapidité d'intervention, une machine restaurée, et le Génie Civil qui reste identique. Dans le cadre d'une rénovation, différentes contraintes sont imposées : les dimensions de la carcasse (diamètre et longueur), la hauteur de l'arbre, le refroidissement, et le rotor de la machine.

La première possibilité d'amélioration des performances de la machine se fera par le biais du circuit magnétique [3]. Depuis les années 1950, les constructeurs de tôles à grains Non Orientés (NO) ont fait des progrès remarquables. La

composition chimique [4], les techniques de production et de découpe des tôles vont être des atouts majeurs dans l'augmentation des performances.

En plus du changement des tôles, il est possible de modifier les dimensions du circuit magnétique, plus précisément celles des encoches du stator. La meilleure qualité de tôles va permettre d'augmenter la limite de saturation, il sera alors possible de faire des encoches au stator moins larges, mais plus profondes afin de garder la même surface de cuivre, et donc permettre d'avoir une dent de largeur supérieure.

Il est également possible d'augmenter l'induction dans l'entrefer. Par exemple dans le cas d'un alternateur, pour une dimension de machine identique ainsi qu'un fonctionnement à pertes égales l'objectif sera d'obtenir une machine plus puissante.

Les recherches menées sur les nouvelles méthodes d'isolations des machines avec une alimentation haute tension permettent de démontrer qu'on peut réduire l'épaisseur des isolants. Une nouvelle amélioration est alors possible pour augmenter la section de cuivre à taille d'encoche égale, par conséquent diminuer la densité de courant et ainsi réduire les pertes joules de la machine [5] [6].

### 3. Évolution de la performance des tôles.

Les progrès dans la fabrication des tôles à grains NO découlent d'une composition moléculaire plus optimale en plus d'un processus amélioré. Pour avoir une tôle Fe-Si avec des pertes totales massiques minimales, il faut que la taille optimale des grains soit de 150  $\mu\text{m}$  [7], quel que soit le taux de Silicium.

Les impuretés et les joints des grains créent des obstacles aux déplacements des parois des domaines magnétiques lors de l'aimantation du fer. La réduction des impuretés va favoriser l'augmentation de la taille des grains, celle-ci réduit le nombre de parois à déplacer donc les pertes par hystérésis. Néanmoins comme la vitesse d'aimantation et de déplacement des domaines augmente, les pertes par courant de Foucault deviennent supérieures [7].

Pour notre étude, nous allons comparer les caractéristiques de tôles magnétiques récentes et plusieurs anciennes caractéristiques de tôles utilisées dans les années 1960 [8]. Les pertes totales massiques sont déterminées avec des coefficients de matériaux qui dépendent du type de tôles.

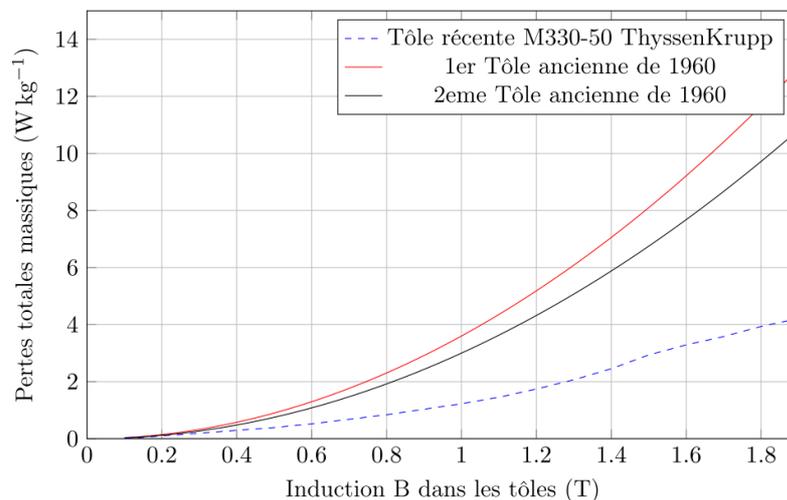


Figure 1 Comparaison des pertes totales massiques de deux qualités de tôles.

On retrouve dans la Figure 1 une comparaison d'une tôle 0.5 mm classique récente de chez ThyssenKrupp, avec deux tôles tirées du livre de Liwshitz [8].

On remarque que les pertes sont plus faibles pour les tôles récentes de Thyssen Krupp, cela aura un impact direct sur les pertes totales de la machine, donc sur le rendement. En plus de cela, les courbes B(H) de la figure 2 montrent la meilleure perméabilité des tôles récentes. Elles montrent que, pour une même induction, le champ magnétique étant plus faible, les chutes de potentiel magnétique partielles dans le circuit magnétique vont être légèrement plus faibles et on peut espérer une réduction du courant magnétisant.

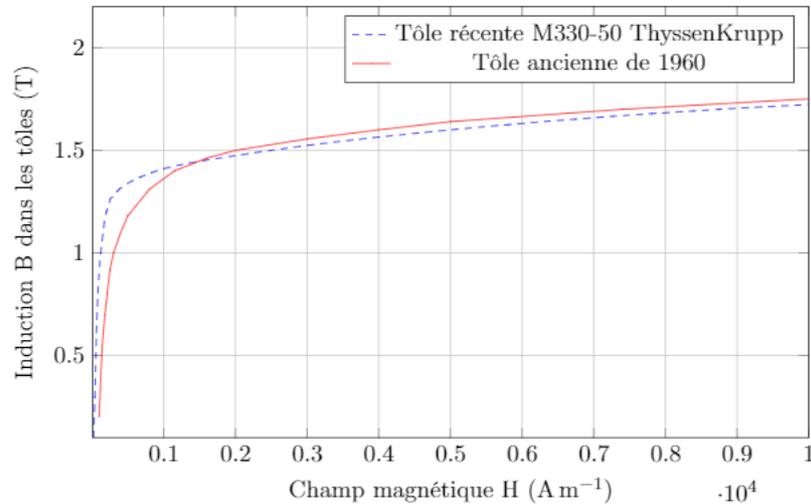


Figure 2 Comparaison de courbes de magnétisation B(H) de deux qualités de tôles différentes.

#### 4. Présentation de la Machine

Le moteur asynchrone étudié est utilisé pour la distribution de l'eau, plus précisément pour l'entraînement de pompe. Les informations présentées dans le Tableau 1 sont les dimensions géométriques de la carcasse, du circuit magnétique, des encoches au stator et rotor, ainsi que la plaque signalétique. Le rotor est à cage d'écureuil et le bobinage statorique à double couche.

Tableau 1 Données connues pour la machine 2 MW

$P_u$	2.06 MW	Diamètre extérieur	1840 mm
$U$	5.5 Kv	Diamètre intérieur	1480 mm
$I$	235 A	Longueur de la machine	450 mm
Paires de pôles	5	Longueur du fer	390 mm
$Z_1$	180 encoches	Entrefer	2.1 mm

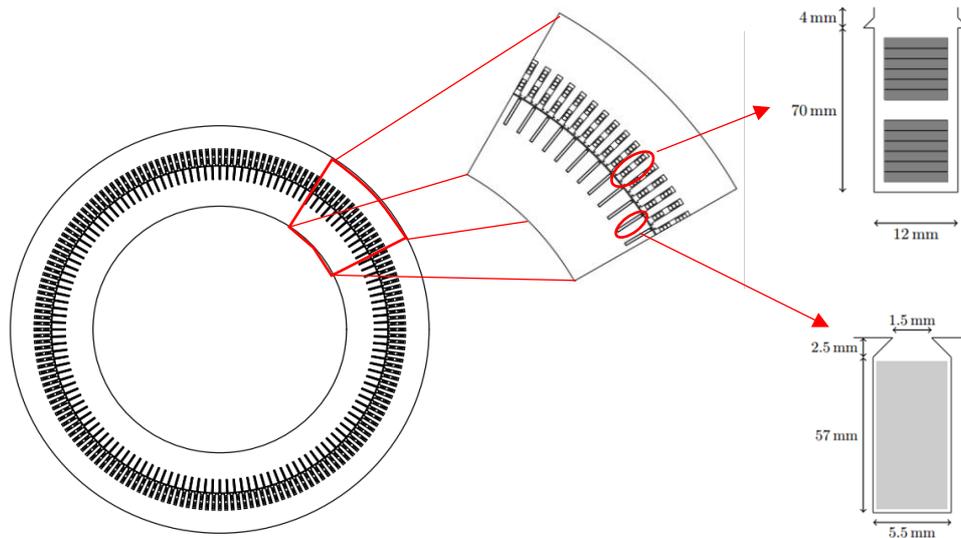


Figure 3 Caractéristique des encoches du circuit magnétique.

## 5. Etude du rendement.

Le redimensionnement de la machine va considérer certaines hypothèses de départ, et calculer la totalité des inductions dans la machine pour une certaine qualité de tôles, le courant magnétisant, les inductances de fuite, les résistances, les pertes de la machine, le schéma équivalent et enfin le rendement.

Nous allons calculer les pertes dans le moteur asynchrone qui sont essentiellement de trois types :

- Les pertes par effet joule, au stator et au rotor, représentent environ 30 % des pertes à vide et 70 % en charge.
- Les pertes mécaniques dues aux frottements des parties mécaniques en rotation au niveau des roulements et de la ventilation (lors d'un refroidissement par ventilation, comme dans notre cas).
- Les pertes fer qui sont dues aux variations de flux dans les tôles magnétiques, et créent des échauffements. Ces pertes représentent la moitié des pertes à vide et 25% en pleine charge. Les travaux de Steinmetz expriment avec des approches empiriques les pertes magnétiques par l'équation (2), celle-ci est applicable lorsque l'induction magnétique est inférieure ou égale à 1T [9].

$$P_t = K_h * B_m^n * f \quad (2)$$

avec  $B_m$  l'induction magnétique maximale,  $f$  la fréquence du champ magnétique, et  $K_h$ ,  $n$  des coefficients qui dépendent du matériau laminé

Le principe de séparation des pertes fer introduit par Bertotti [10] est une approche pour évaluer les pertes plus précisément. Elle permet de séparer les pertes magnétiques en pertes statiques, classiques et par excès comme indiqué dans l'équation (3) [11]

$$P_t = P_{stat} + P_{clas} + P_{exc} \quad (3)$$

- Les pertes statiques ( $P_{stat}$ ), encore appelées pertes par hystérésis sont dues au caractère discontinu et irréversible des processus d'aimantation. Le déplacement des parois des domaines qui va génère ces pertes.
- Les pertes classiques ( $P_{clas}$ ) sont produits par des courants induits dans le circuit magnétique, on les appelle aussi les pertes par courant de Foucault macroscopiques. Il est possible de les réduire en utilisant un circuit magnétique feuilleté
- Les pertes par excès ( $P_{exc}$ ) représentent les effets dus aux mécanismes microscopiques dynamiques des parois.

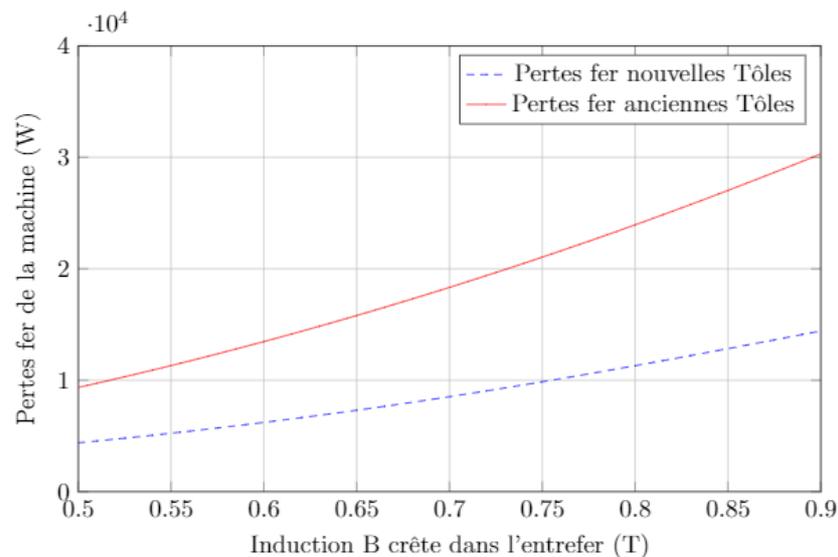
On se limite ici à un calcul pour un fonctionnement à 50 Hz et au point de fonctionnement nominal, la suite des travaux prendra en compte une étude harmonique pour augmenter la précision des résultats

Le changement des tôles du circuit magnétique a un impact direct sur le rendement de la machine. Grâce à une meilleure qualité des tôles, il y aura une amélioration du rendement de la machine, qui passe par le biais de la réduction des pertes dans le fer de la machine. Les pertes que nous prenons en compte pour ce calcul sont les suivantes :

- Pertes Cuivre dans l'enroulement statorique
- Pertes Cuivre dans l'enroulement rotorique
- Pertes additionnelles dans le cuivre
- Pertes dans le fer de la culasse statorique
- Pertes dans le fer des dents au stator
- Pertes superficielles dans le stator
- Pertes superficielles dans le rotor
- Pertes par pulsation de flux dans le stator
- Pertes par pulsation de flux dans le rotor
- Pertes par ventilation et par frottement dans les paliers

Ces pertes sont calculés à partir de formules analytiques données dans [8][12][13].

Les figures 4 et 5 présentent l'impact du changement de tôles pour plusieurs valeurs d'induction crête dans l'entrefer. Les pertes dans le fer de la machine sont réduites grâce à une meilleure qualité de tôles, cette réduction a un effet sur le rendement de la machine. Ici pour une induction de 0.7 T, nous avons une amélioration du rendement de 0.4 point et pour 0.9 T, une amélioration 0.7 point.



**Figure 4** Comparaison des pertes dans le fer pour deux qualités de tôles.

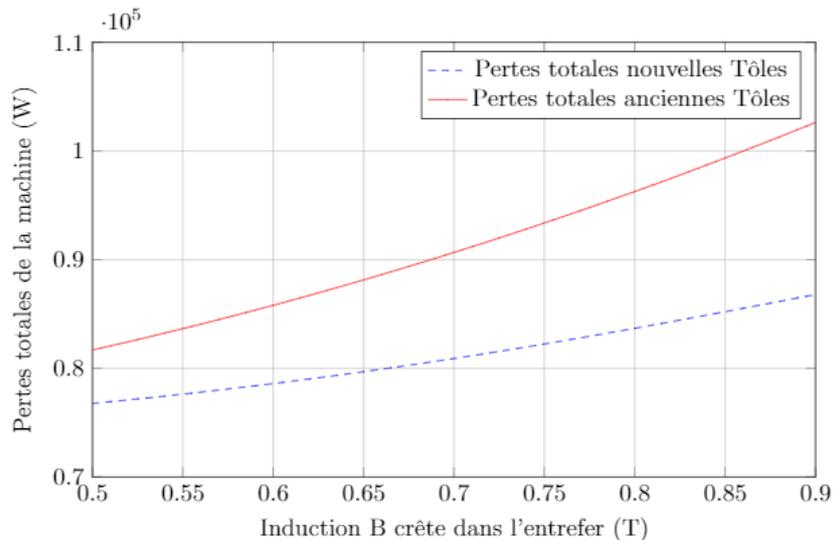


Figure 5 Comparaison du rendement pour deux qualités de tôles.

## 6. Conclusion et perspectives de travail

L'étude présentée dans cet article met en évidence le gain possible en rendement lors d'un simple changement du circuit magnétique d'une ancienne machine tournante. Un modèle simple montre que la réduction des pertes dans le fer va pouvoir être d'au moins la moitié des pertes actuelles.

Une amélioration du modèle est importante pour estimer au mieux le gain obtenu. La prise en compte des harmoniques d'induction pourra faire évoluer les résultats sur les pertes de la machine. L'utilisation des éléments finis va permettre de déterminer plus précisément la distribution de ces harmoniques.

Les possibilités d'amélioration d'une machine lors d'une rénovation sont nombreuses. Les futurs travaux vont permettre de quantifier l'augmentation des performances d'une machine en modifiant les dimensions du circuit magnétique, l'épaisseur ainsi que la classe d'isolation des isolants. Des outils d'optimisation seront mis en œuvre.

Les études seront adaptées pour les alternateurs synchrones, pour permettre d'augmenter pour la puissance de la machine en gardant un diamètre et une longueur identique. La modification de la largeur des dents sera donc obligatoire pour augmenter l'induction crête dans l'entrefer.

Une autre perspective de travail sera de quantifier précisément l'amélioration des performances de la machine et de les comparer à un modèle d'éléments finis puis à une expérimentation.

## Références

- [1] B. Laratte: "Eco-conception & ACV pour l'innovation et le développement durable : Analyse de cycle de vie Principes, applications et limites". EVEA Évaluation et Accompagnement SARL.(2009)
- [2] W. Boughanmi, J-P Manata, D Roger, J-F Brudny, "Écoconception des machines électriques tournantes à courants alternatifs" (2014)
- [3] B. Cassoret, J-F Brundy, T. Belgrand, "Accroissement de l'efficacité énergétique des moteurs à courants alternatifs", Techniques de l'ingénieur (2013).
- [4] G. Couderchon, "Tôles et alliages magnétiques doux", Techniques de l'ingénieur (1987).
- [5] M.Shadmand, "New Insulating System for Upgrading of Old Large Turbo Generators" (2016)
- [6] TARI, M., YOSHIDA, K., SEKITO, S., et al. A high voltage insulating system with increased thermal conductivity for turbo generators. In : Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Technology Conference, 2003. Proceedings. IEEE, 2003. p. 613-617.

- [7] BAVAY, J.-C. et VERDUN, J. Les aciers électriques pour transformateurs et machines tournantes. Situation actuelle et perspectives. Le Journal de Physique IV, 1992, vol. 2, no C3, p. C3-37-C3-46.
- [8] LIWSCHITZ-GARIK, Michael, MARET, Louis, et CHATELAIN, Jean-Daniel. Calcul des machines électriques. Spes, 1967 (Tomes 1 et 2)
- [9] Steinmetz, C., ‘On the law of hysteresis’, Proceedings of the IEEE 72, 197–221 (1984).
- [10] BERTOTTI, Giorgio. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. IEEE Transactions on magnetics, 1988, vol. 24, no 1, p. 621-630.
- [11] LOPEZ, Samuel. Définition de nouvelles structures de circuits magnétiques de machines AC utilisant des tôles à grains orientés. 2011. Thèse de doctorat. Artois.
- [12] BOUCHARD, Réal-Paul et OLIVIER, Guy. Conception de moteurs asynchrones triphasés. Presses inter Polytechnique, 1997.
- [13] BOLDEA, S. A. Nasar, “The induction machines design handbook, ”. 2010.