

# Comparaison des systèmes de mesure et influence de la direction de laminage sur les pertes magnétiques et sur la courbe anhystérétique

Oussama HAMRIT, Olivier de la BARRIERE, Martino LOBUE, Michel LECRIVAIN, Frédéric MAZALEYRAT  
SATIE, ENS Cachan, CNRS, 61 Avenue du Président Wilson, F-94230 Cachan, France

**RESUME** -Une étude approfondie pour éviter les effets capacitifs inter-spires à haute fréquence au niveau de la bobine de  $H$  a été menée, ensuite une comparaison entre trois systèmes de mesures Epstein 700 spires, Epstein 200 spires et un perméamètre SST comme système de mesure de référence sert à montrer les limites de chaque système de caractérisation. Un facteur correctif empirique est introduit, afin d'obtenir la valeur des pertes locales à partir des pertes mesurées sur le cadre d'Epstein (Epstein 700 tours sur la plage de fréquences DC-400 Hz, Epstein 200 tours de 400Hz à 10kHz). Une étude de l'influence de la direction de découpe par rapport à la direction de laminage pour des échantillons FeSi à grain non orientés a été menée sur les pertes et sur les courbes anhystérétiques. L'effet de la découpe au laser a été aussi mis en évidence. En effet, cette dernière est susceptible d'induire des erreurs sur la mesure des pertes. A la fin, une comparaison entre deux qualités de tôles FeSi non orientés ayant des pertes en statique similaires et d'épaisseurs différentes a été réalisée.

**Mots-clés**—Cadre d'Epstein, perméamètre SST, perte magnétique, effet capacitif, mesure locale, anisotropie, effet de découpe

## 1. INTRODUCTION

Dans les applications exigeantes du Génie Electrique telles que le véhicule hybride, les machines électriques, ainsi que leur système de refroidissement, sont dimensionnés « au plus juste », étant donné que dans ces systèmes embarqués, la masse constitue un critère de première importance [1]. Dans ce contexte, une estimation approximative des pertes peut facilement mener à des solutions non viables sur le plan thermique. Les pertes fer constituant une composante fondamentale du rendement de la machine, il apparaît donc indispensable de les estimer de manière précise. Cette tâche est devenue encore plus délicate avec l'engouement récent pour les machines haute vitesse (donc haute fréquence), qui laissent présager des gains importants en termes de couple massique [2], mais au prix de pertes fer plus importantes.

La méthode de caractérisation la plus répandue des matériaux magnétiques laminés est sans conteste le cadre d'Epstein (CE) 700 tours pour les bobinages primaires et secondaires, et compensation du flux dans l'air [3]. Ce système de caractérisation offre l'avantage d'être reproductible et relativement aisé à mettre en œuvre (le champ est mesuré directement par le courant), mais il importe de se demander si

la valeur des pertes ainsi mesurée n'est pas biaisée par le principe même de la mesure, et correspond vraiment à la valeur des pertes locales dans la tôle, qui seule importe dans une optique de conception de machines électriques. Certains travaux ont été menés sur les erreurs systématiques induites par le CE, en particulier le problème des effets capacitifs au niveau du bobinage primaire, du secondaire, ou entre les deux [4]. Pour résoudre ces difficultés, les pertes à haute fréquence sont mesurées avec un CE 200 tours [5]. La longueur moyenne du circuit magnétique est normalisée à 0.94 m (norme [3]). L'impact de ce choix sur la mesure des pertes est discuté dans les références [6, 7], qui proposent une amélioration du calcul de ce chemin magnétique moyen. L'effet des coins du cadre, qui génèrent des erreurs du fait de la division par deux du niveau d'induction lorsque les tôles se chevauchent, est quant à lui analysé dans les références [8, 9].

Une solution aux difficultés précédentes peut être l'utilisation d'un système de mesure à échantillon unique, comme le perméamètre, que nous désignerons par l'acronyme anglais SST (*Single Sheet Tester*) [10, 11, 12]. Un unique échantillon est utilisé dont la dimension dépend de celle du SST. On rencontre deux méthodes de mesure de l'induction magnétique B : un bobinage enroulé autour de l'échantillon (méthode la plus courante), et la méthode des pointes, autorisant une mesure locale de l'induction sans perçage, mais susceptible néanmoins d'introduire certaines erreurs de mesures et un signal capté souvent faible [13]. Le champ magnétique H, quant à lui, est difficilement évaluable par la méthode du courant (théorème d'Ampère) à cause des chutes de potentiels magnétiques et des pertes dans les culasses, engendrant une méconnaissance du chemin magnétique réel. La mesure locale du champ magnétique apparaît donc la plus adéquate. Un moyen est d'utiliser une bobine de H (souvent désignée par "*H-coil*" dans la littérature anglo-saxonne [19]), qui est une bobine plate captant la composante tangentielle du champ magnétique à la surface du matériau. Pour tenir compte de la variation rapide du champ magnétique lorsque l'on s'éloigne de la surface du matériau, on peut éventuellement utiliser deux H-coils situées à des distances différentes de la surface, et extrapoler le champ mesuré afin d'estimer le champ réel dans le matériau [10].

Dans la première partie de ce travail, le perméamètre et les méthodes de mesures sont présentés ; dans la deuxième section, une formulation empirique qui permet la correction de la mesure sur le CE pour obtenir les pertes locales (mesure sur SST) est proposé, une discussion de ses limites d'utilisation est menée dans la même section.

Dans ce qui suit, le mot anisotropie fait référence au changement de la valeur de perte magnétique selon la direction d'application de champ magnétique par rapport à la direction de laminage (DL). La direction de découpe par rapport à la DL des tôles correspond à la direction d'application du champ magnétique par rapport à la DL.

L'anisotropie des matériaux magnétiques a été étudiée depuis plusieurs années soit en découpant les tôles dans plusieurs directions par rapport à la DL et en utilisant un CE ou un SST pour les caractériser, ou bien en développant de nouveaux moyens de mesure, comme celui présenté dans [13] qui utilise un système de caractérisation basé sur le mouvement de rotation d'une série de disques magnétiques. D'autres systèmes de mesure ont par la suite été développés. Il s'agit principalement des dispositifs de mesure en champ bidimensionnel [14, 15], classiquement dédiés aux mesures en champ tournant, mais ici contrôlés afin d'imposer un locus de champ alternatif dans une direction quelconque par rapport à la DL. Un système classiquement rencontré pour ce genre d'expérience est le perméamètre dont la culasse supérieure est décalée de 90° par rapport à la culasse inférieure, de manière à générer le locus d'induction désiré. Ce dispositif est connu sous le nom de RSST (*Rotational Single Sheet Tester*). Notons que la plupart des études réalisées portent sur l'anisotropie des tôles FeSi à grain orientés, matériaux notoirement anisotropes.

La quatrième section de ce papier est consacrée à l'étude de l'anisotropie des tôles FeSi à grains non orientés, coupés sous forme de bandes d'Epstein conventionnelles (300mm sur 30mm), d'épaisseur 0.2mm et 0.35mm dans les directions 0°, 30°, 60° et 90° par rapport à la DL. En effet, dans les machines électriques fabriquées dans les applications telles que la traction hybride, les tôles du stator sont découpées d'un seul tenant [17], et l'angle entre la DL et la direction préférentielle du flux n'est pas un paramètre contrôlable, et change d'un pas dentaire à l'autre. Par conséquent, il est utile de pouvoir fournir aux concepteurs de machines une valeur de pertes moyennée suivant les directions différentes. Dans ce contexte, il apparaît important de se demander si la méthode préconisée par la norme de remplissage du CE avec des tôles laminées dans les directions 0°/30°/60°/90° [18] fournit réellement une valeur des pertes moyennes. Dans ce travail, on discute cette question avec une étude approfondie sur l'influence de la disposition des bandes d'Epstein dans le cadre, une comparaison de la configuration normalisée avec des dispositions uni angulaire (0° dans les 4 bandes du cadre par exemple) est discutée dans la section 4.

## 2. DISPOSITIF EXPERIMENTAL

### 2.1. Description du perméamètre SST

Le système de mesure SST est composé de deux culasses identiques entre lesquelles se trouve une bande d'Epstein conventionnelle (300mm sur 30mm), voir Figure 1a. L'échantillon est logé à l'intérieur de la bobine d'excitation de

longueur 19cm (tout l'espace inter-culasse). Deux types de bobines ont été utilisés, une bobine cylindrique avec un grand nombre de spires (de 460 à 1500 spires) pour des mesures à basses fréquences, et une bobine avec seulement 80 spires éloignées de manière à minimiser les effets capacitifs pour les mesures en plus haute fréquence. Cette dernière bobine est de forme rectangulaire aplatie pour une bonne homogénéité du champ appliqué [17]. L'induction magnétique B est mesurée par une B-coil, constituée de spires bobinées sur un gabarit de plastique rectangulaire. Le nombre et la distance entre les tours sont choisis selon la plage de fréquence de mesure, de manière à avoir un signal suffisant tout en pouvant ménager un espace suffisant entre les spires qui évite les effets capacitifs. Un calibrage dans un solénoïde à vide a été effectué, de manière à compenser le flux dans l'air [17]. Le champ magnétique H est mesuré par une H-coil. Ce capteur a été réalisé en bobinant un fil fin sur un gabarit de verre rectangulaire de faible épaisseur pour capter le champ au plus proche de la surface de l'échantillon. Une calibration a ensuite été effectuée. Les deux capteurs sont positionnés au centre de l'échantillon Figure 1b, la mesure est réalisée au centre du matériau, où le champ appliqué est homogène. Il est permis de penser que la configuration du système de mesure ainsi que le fait que la mesure soit locale donne des valeurs de pertes les plus proches de celles intrinsèquement mises en jeu dans le matériau.

Un système de contrôle basé sur la méthode de correction du flux mesuré [7] est mis en place et permet d'obtenir une forme d'onde d'induction sinusoïdale pour une induction pic  $B_p$  et une fréquence  $f$  donnée. La bobine d'excitation est alimentée par un amplificateur linéaire KEPCO pour les basses fréquences (0 à 400Hz) et par un amplificateur audio plus puissant SAMSON SX3200 pour les moyennes fréquences (de 400Hz à 10kHz). Ces amplificateurs sont contrôlés par un générateur de signaux arbitraires commandé par l'algorithme d'asservissement et d'acquisition réalisé en environnement MATLAB. Les signaux de la H-coil et de la B-coil sont visualisés sur un oscilloscope LECROY 12bits avant d'être transférés sur l'ordinateur pour le calcul des pertes et l'algorithme de rétroaction. La valeur de pertes magnétique est donnée en calculant l'air du cycle B(H) mesuré :

$$W_{perte} = \int H \cdot dB \quad (J \cdot m^{-3}) \quad (1)$$

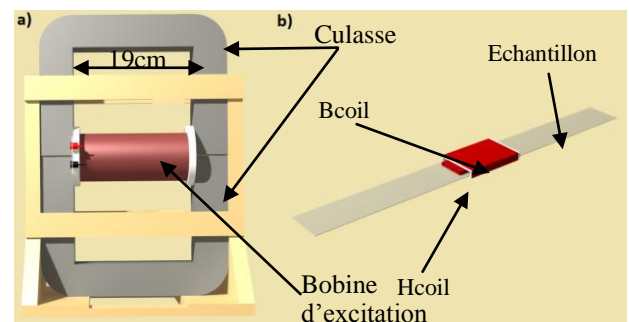


Figure.1 SST complet a), échantillon de tôle avec Hcoil et Bcoil b).

## 2.2. Effets capacitifs

Bien que les capteurs de champ soient des bobines ayant une inductance et une résistance dans le cas idéal, la présence d'une capacité parasite inter-spire peut fausser la mesure aux plus hautes fréquences. On peut représenter le schéma électrique équivalent de la Hcoil à haute fréquence (Figure. 2) avec  $L$  l'inductance de la bobine,  $R$  est la résistance du fil de bobinage et  $C$  la capacité parasite inter-spires, son impédance complexe est donné par l'équation 2.

Augmenter la distance entre les spires de la bobine est une solution pour réduire la capacité inter-spires. Des bobines avec des distances  $\delta$  entre spire différentes ont été réalisées. Une analyse phase-impédance a été menée à l'aide d'un analyseur d'impédance. Lors de la mesure la Hcoil a été posé directement sur le matériau pour prendre en compte l'effet de ce dernier. En effet le fait de mettre la H-coil sur le matériau a diminué d'un facteur 2 la valeur de la fréquence de résonance due au fait que l'échantillon agit comme un miroir de champ électrique. D'après l'analyse (Figure 3), la bobine adopte un comportement linéaire traduit par le module et la phase complexe de l'équation 2 sur un intervalle de fréquence allant de 0 à la fréquence de résonance. Au-delà de cet intervalle, le comportement de la bobine devient non linéaire; de plus ce comportement dépend fortement du matériau sur lequel la H-coil est posée, de l'épaisseur du fil et de la qualité de l'isolant du fil. Sur l'intervalle qui nous intéresse (0 à 10kHz), la bobine a plutôt un comportement résistif qui ne varie pas significativement, alors que sur la phase on remarque des variations minimales ( $5^\circ$  de différence entre la bobine  $\delta = 0\text{mm}$  et  $\delta = 0.25\text{mm}$  à 10kHz). Cette différence entraîne une erreur sur la valeur des pertes magnétiques qui n'est pas facile à évaluer car la tension induite aux bornes de la H-coil n'est pas sinusoïdale. Sur la figure 2, des résultats d'analyse d'un bobinage avec une distance inter spires égale à 0mm, 0.1mm et 0.25mm montrent que la phase diminue en fonction de la distance inter-spires, certes que cette diminution est due à la diminution de la valeur de l'inductance  $L$ , mais aussi de la capacité parasite.

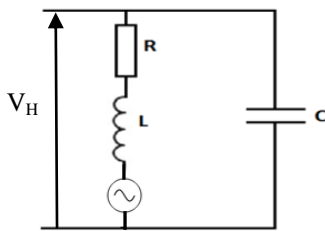


Figure.2 Modèle électrique équivalent d'une bobine de H à haute fréquence

$$\underline{Z} = \frac{R + jL\omega}{1 + jCR\omega - LC\omega^2} \quad (2)$$

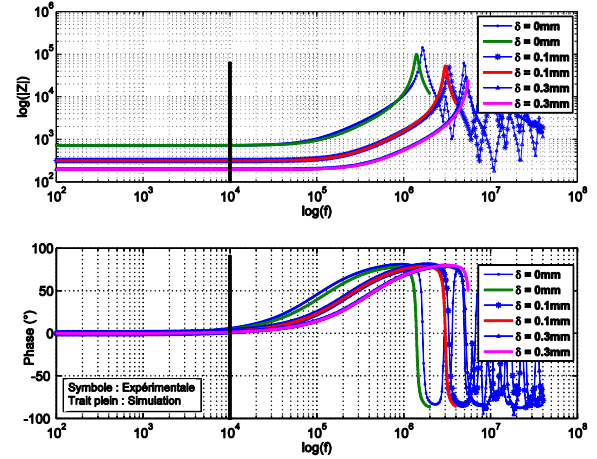


Figure.3 Analyse d'impédance et de la phase de 3 bobines à distance inter spire égale à 0mm, 0.1mm et 0.25mm (résultat expérimental et simulation)

Étant donné que l'analyse phase-impédance n'a pas permis de donner une information sur le choix de la distance inter-spires, nous avons opté pour une approche empirique. Des mesures de pertes sur la plage de fréquence voulue (0 à 10kHz) en utilisant les 3 H-coils analysées précédemment ont été faites. On peut dire que les effets capacitifs sont négligeables lorsque la mesure de perte ne varie plus en fonction de l'éloignement des spires du bobinage. En effet l'expérience a montré que la différence relative entre les mesures réalisées avec une bobine  $\delta=0.15\text{mm}$  et une bobine  $\delta=0.3\text{mm}$  ne dépasse pas 3% sur la plage de fréquence allant de 200Hz à 10kHz alors que la bobine à spire jointive a tendance à sous-estimer les pertes, la différence devient significativement importante à partir de 3kHz, elle atteint les 7% à 10kHz pour une induction  $J_p = 0.5\text{T}$ . Pour les plus faibles valeurs de  $J_p$ , elle reste négligeable (Figure 4).

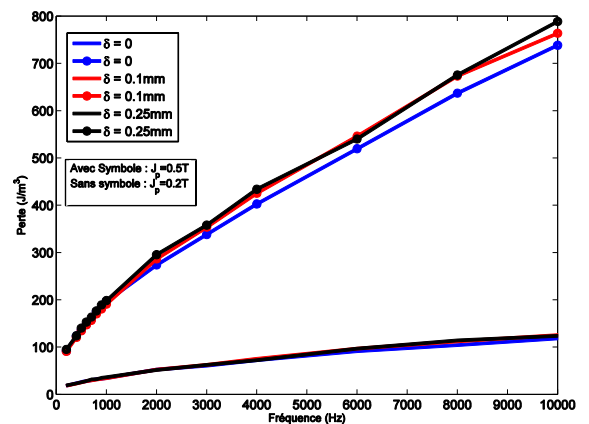


Figure.4 Perte magnétique en fonction de la fréquence pour 3 H-coils avec des distances inter-spires égales à 0mm, 0.1mm et 0.25mm.

### 3. ETUDE DES MESURES SUR CE

Dans cette partie, le système de mesure de référence est le SST décrit précédemment.

#### 3.1. Comparaison SST et CE à basse fréquence (< 400Hz)

Dans cette partie les mesures ont été réalisées en remplissant le cadre d'Epstein avec des bandes découpées dans une seule direction (DL), l'échantillon testé sur le SST est l'une des bandes utilisées dans le cadre d'Epstein.

On s'intéresse à l'écart observé entre la mesure locale de référence (SST), et le CE 700 tours primaire/secondaire, qui constitue le système de mesure le plus répandu [3]. Malheureusement ; il tend à sous-estimer les pertes [17]. Cela vient du fait que dans les coins, là où les tôles se chevauchent, l'induction magnétique est divisée par deux. Pour illustrer ce fait, nous avons effectué une mesure locale des pertes à l'aide d'une H-coil sur cadre d'Epstein. Nous avons déplacé cette H-coil du centre de la tôle vers les coins (Figure 3), et observé une diminution des pertes lorsque l'on s'approche des coins du cadre (Figure 4).

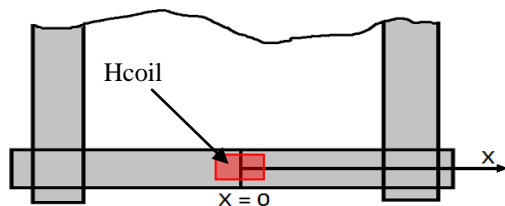


Figure.5 Position de la H-coil sur un échantillon dans le cadre d'Epstein

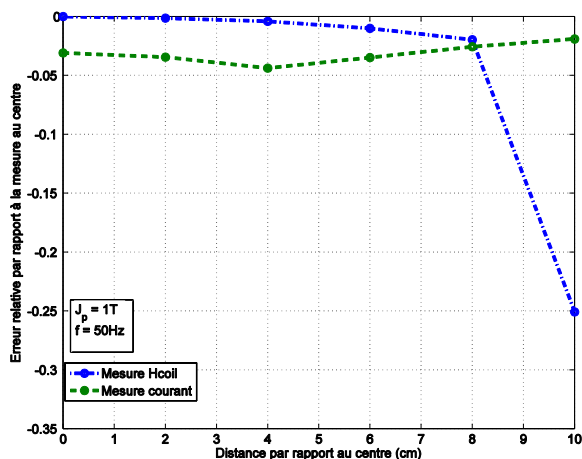


Figure.6 Erreur relative entre les pertes mesurées avec une Hcoil au centre de l'échantillon et en fonction de la distance par rapport au centre bleu, erreur relative entre une mesure au centre de la tôle et une mesure avec la méthode de courant.

Une étude comparative entre la mesure avec une Hcoil posée au centre d'un échantillon et une mesure avec le perméamètre sur le même échantillon a montré que le résultat est exactement le même (Figure 5).

Nous souhaitons corriger de manière empirique le résultat donné sur Epstein par la méthode du courant, afin d'obtenir la valeur intrinsèque des pertes donnée par le perméamètre.

Afin de corriger la mesure sur CE pour obtenir la mesure sur SST, on propose une formulation empirique indépendante de la fréquence et du niveau d'induction (3) :

$$W_{SST} = \frac{W_{Epstein}}{0.935} \quad (3)$$

La figure 6 montre que la correction est possible jusqu'à 400Hz, au-delà de cette fréquence la différence devient plus importante (14% à 900Hz), cela est due à l'apparition des effets capacitifs au niveau du primaire et du secondaire du CE 700 tours [7], sans oublier la limitation en puissance pour la réalisation des mesures à plus hautes fréquences.

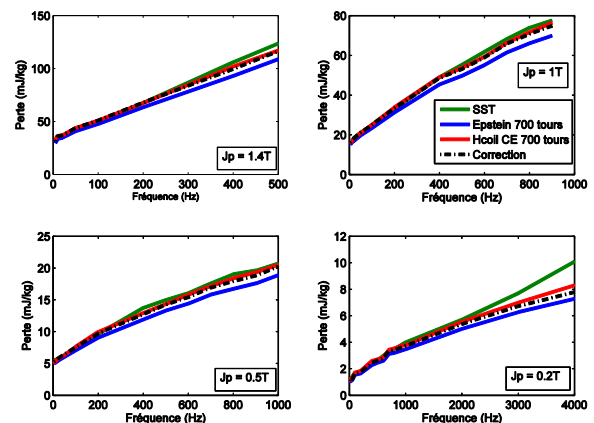


Figure.7 Pertes magnétiques en fonction de la fréquence avec une mesure sur CE 700 tours, une mesure sur CE 700 tours avec une Hcoil, une mesure sur SST et une correction à 6.5% des mesures sur CE (La H-coil est au centre de l'échantillon).

Il faut noter que la correction proposée est valable également pour toutes les directions de découpe par rapport à la DL.

#### 3.2. SST vs CE en moyennse fréquences( 400Hz à 10kHz )

L'écart entre le CE 700 tours et le SST se creuse en plus haute fréquence à cause des effets capacitifs au primaire, au secondaire et entre les deux [7]. Pour éviter ces effets indésirables, on utilise un CE 200 tours comme le préconise la norme [3]. Il est remarquable que l'on retrouve le même écart entre SST et CE 700 tours aux basses fréquences, ce qui va nous permettre d'utiliser la même méthode de correction.

Une comparaison des pertes en fonction de la fréquence entre les mesures CE 700 tours et CE 200 tours (Figure 6) montre qu'on peut trouver les pertes locales par correction de la mesure sur le cadre d'Epstein 200 tours, à partir de 5kHz. On a remarqué une différence entre la valeur corrigée et la mesure et devient de plus en plus importante en fonction de l'augmentation de la fréquence cela est peu être dû au changement de la dépendance des pertes en fonction de la fréquence, mais la différence reste acceptable, à 10kHz après correction, elle est inférieure à 5%.

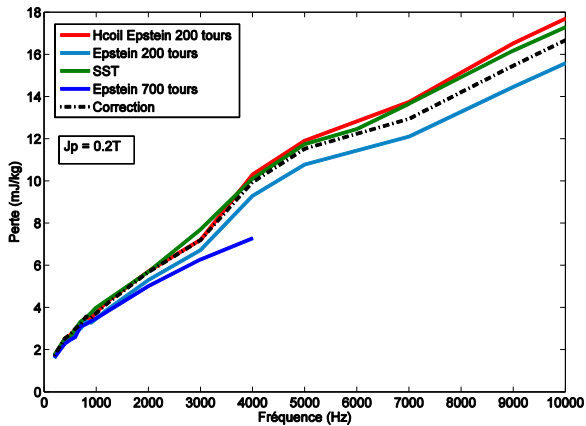


Figure. 8 Perte magnétique en fonction de la fréquence avec une mesure sur CE 700 tours, CE 200 tours, CE 200 tours avec une Hcoil, SST et une correction (3) des mesures sur CE 200 tours

Un point important est l'élévation de la température pour les mesures à partir de 2kHz. La variation de température a une influence significative sur la valeur des pertes mesurée et entraîne une erreur importante sur les valeurs de l'induction et du champ magnétique captés. C'est pourquoi les résultats présentés dans cet article ont été obtenus avec contrôle de la température (de 25 à 30°C). Nous avons mesuré la température à la surface de l'échantillon avec un thermocouple et limité l'élévation de température en attendant le refroidissement de l'échantillon entre chaque itération, tout en effectuant les mesures en moins d'une seconde.

La figure 7 montre aussi la nécessité de passer au CE 200 tours pour éviter les erreurs importantes du CE 700 tours, qui est le siège d'effets capacitifs trop importants à partir de 400 Hz.

#### 4. INFLUENCE DE LA DIRECTION DE LAMINAGE

##### 4.1. Influence sur les pertes

Des bandes d'Epstein de dimension conventionnelle (300mm par 30mm) en FeSi 3% à grains non-orientés ont été découpées dans 4 directions 0° (DL), 30°, 60° et 90° (cette dernière est la direction transverse, ou DT) par rapport à la DL. Le CE a été rempli comme dans la norme [5], chacune des directions occupe un bras du cadre d'Epstein. Ensuite nous avons réalisé des mesures en remplissant les quatre bras du cadre avec une seule direction de découpe (e.g uniquement 0° dans les 4 bras). Cette expérience a été répétée pour les 4 directions. Les mesures réalisées ont montré que ce matériau présente une certaine anisotropie de pertes (Figure 8) : il existe en effet une grande différence entre la mesure des pertes dans une tôle découpée dans la DL et une tôle découpée dans la DT (plus que 20% de différence en valeur relative). Une telle différence peut avoir des effets sur les applications (machines électriques).

Pour avoir une idée générale sur les caractéristiques du matériau, une mesure dans les quatre directions comme le préconise la norme [3], [6], donnera la moyenne de la mesure dans tous les directions (Figure 7).

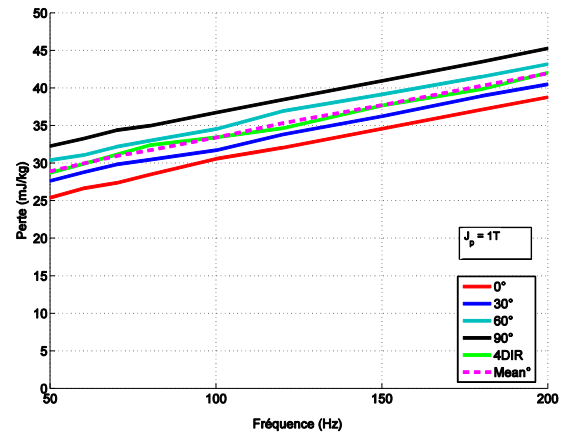


Figure.9 Pertes magnétiques en fonction de la fréquence pour les directions de découpe par rapport à la DL (0°, 30°, 60° et 90°), la moyennes des 4 et le cadre rempli avec les 4 directions.

##### 4.2. Influence sur la courbe anhystérique

Les logiciels éléments finis commerciaux utilisent souvent des courbes anhystérique comme lois B(H) du matériau. Il importe donc d'étudier comment évolue cette courbe en fonction de la DL.

Une acquisition d'un cycle à saturation en régime quasi-statique (1Hz) en remplissant le cadre d'Epstein comme décrit à la sous-section précédente a été réalisée, ensuite, en moyennant pour chaque valeur d'induction les champs magnétiques sur la courbe à saturation montante et descendante, on obtient une courbe rapproché de les courbes anhystérique (Figure 9).

La perméabilité du matériau a tendance à diminuer quand l'angle de découpe par rapport à la DL augmente. On a vérifié que la moyenne des 4 courbes mesurées en remplissant le cadre d'Epstein avec une seule direction de découpe est égale à la courbe anhystérique acquise lors du remplissage du cadre d'Epstein avec les 4 directions (Figure 9). Ce résultat nous permet d'avoir la possibilité d'estimer moyennement les pertes lors de l'utilisation d'une courbe anhystérique mesuré lors d'un remplissage du CE avec les 4 directions.

Il faut noter que l'anisotropie du matériau est beaucoup moins visible pour des valeurs d'induction pic importante, à 1.4T la différence ne dépasse pas 10% cela est due au faite que les courbes se rejoignent à saturation.



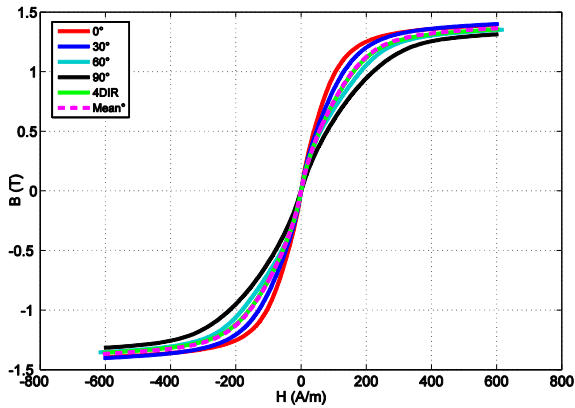


Figure.10 Courbes anhystérique dans les directions de découpe par rapport à la DL  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$ , la moyennes des 4 directions et le cadre rempli avec les 4 directions .

## 5. INFLUENCE DE L'EFFET DE DECOUPE ET DE L'ÉPAISSEUR

### 5.1. Influence de la découpe

Des études approfondies sur l'effet des différents moyens de découpe ont été menés dans [18], montrant qu'il faut surtout tenir compte de la génération de contrainte résiduelle dans la tôle sous l'effet d'une contrainte de compression ou bien sous l'effet de surchauffe de la tôle lors d'une découpe au laser. Nos échantillons ont été découpés au laser dans des tôles de 1 m sur 1 m. Pour observer l'effet de la découpe, des mesures ont été réalisées sur les tôles avant et après un recuit à  $780^\circ\text{C}$  pendant une heure (sous vide pour éviter l'oxydation). Une importante différence (Figure 10) a été observée ( $\sim 25\%$ ). Notre hypothèse est que la découpe au laser modifie la structure métallographique des bords des échantillons, induisant des changements des caractéristiques magnétiques. Ces zones modifiées par la fusion locale, vraisemblablement des grains plus beaucoup plus petits agissent comme des pièges pour les parois de Weiss, induisant inévitablement une augmentation des pertes. Au contraire le recuit a pour effet d'homogénéiser le matériau en relaxant les contraintes de la découpe et permettant la recristallisation des grains sur les bords.

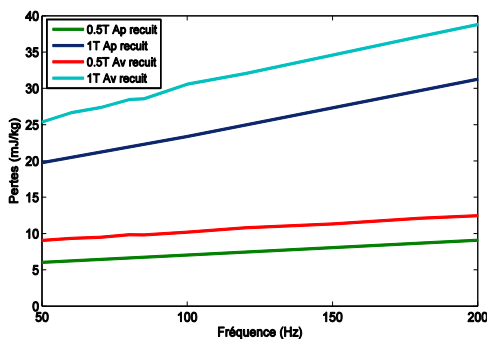


Figure.11 Pertes magnétiques en fonction de la fréquence avant et après recuit

### 5.2. Influence de l'épaisseur

On a choisi deux échantillons de FeSi avec des qualités différentes mais avec des pertes statiques similaires, le premier

est d'épaisseur 0.2mm de qualité supérieur par rapport au deuxième échantillon qui est de qualité conventionnelle ayant une épaisseur de 0.35mm. Ce choix permettra d'étudier la différence entre les deux qualités et de mettre en évidence l'influence de l'épaisseur sur les pertes dynamiques. Des mesures sur ses deux échantillons montrent que l'avantage d'utiliser des tôles de 0.2mm se creuse à haute fréquence là où les pertes sont 2.5 fois plus petites que les pertes dans les échantillons de 0.35mm (Figure 11), cela est due au fait que les pertes dynamiques proviennent essentiellement de la composante classiques qui varie en  $d^2$  (cas d'absence de l'effet de peau), de plus les tôles de 0.2mm chauffent beaucoup moins et ont tendance à évacuer la chaleur plus rapidement à cause de leur surface spécifique plus élevée.

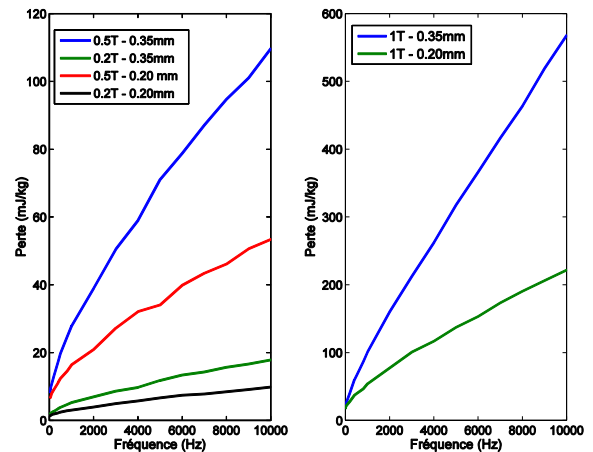


Figure.12 Pertes magnétiques en fonction de la fréquence pour des échantillons d'épaisseur de 0.2mm et 0.35mm

Sur la plage de fréquence de DC à 10kHz l'échantillon de 0.2mm a présenté des pertes similaires en quasi-statique, ensuite il a prouvé un avantage allant jusqu'à 2.5 fois moins de pertes à haute fréquence. Néanmoins, il faut noter que l'échantillon de 0.2mm utilisé ici est d'une qualité supérieure à celle de l'échantillon de 0.35mm (à qualité égale les pertes par hystérésis diminuent avec l'épaisseur); et demande au moins une passe de laminage en plus. Ces tôles sont donc beaucoup plus coûteuses, ce qui peut avoir une influence sur les critères d'optimisation. Les alliages FeCo sont aussi un bon candidat pour les applications haute fréquence mais pas pour une application machine électrique haute vitesse; d'une part à cause de leur coût élevé et d'autre part parce qu'on ne bénéficie pas de l'avantage de ces propriétés. En effet, les inductions maximales circulant dans la machine électrique à hautes fréquences sont faibles ( $< 1\text{T}$ ), alors que l'avantage du FeCo se creuse à des inductions supérieure à 1T pour sa bonne perméabilité et sa haute induction à saturation.

## 6. CONCLUSIONS

Dans ce travail, on a présenté un système de mesure de pertes magnétiques (SST) capable de caractériser les tôles laminés sur une large gamme de fréquence (de 1Hz à 10kHz) et on a comparé trois moyens de mesure (SST, CE 700 tours et CE 200 tours) en montrant expérimentalement les limites de

chaque système et ses avantages et inconvénients. Cette étude comparative a permis de proposer une formulation empirique pour retrouver la mesure locale sur SST à partir d'une mesure sur CE (700 et 200 tours) et valable sur une large gamme de fréquence et d'induction.

Les effets capacitifs inter-spires ont été traités de manière approfondie pour concevoir la H-coil adaptée aux conditions de mesures.

Une étude de l'anisotropie des tôles FeSi à grain non orientés a mis en évidence un comportement anisotrope non négligeable.

Ensuite, nous avons montré que l'effet de la découpe au laser sur la valeur de perte magnétique est important (~25%) sur une tôle de 30mm de large, ce qui montre que le recuit est indispensable pour construire une machine performante, en particulier quand le pas dentaire est en dessous de 10mm.

Enfin, nous avons comparé deux tôles d'épaisseurs différentes et vérifié que le rapport des pertes dynamiques est sensiblement égal au carré du rapport des épaisseurs.

## 7. REMERCIEMENTS

Ce travail a été fait dans le cadre du projet ANR e-méca (ANR-11-VPTT-0008) en collaboration avec l'entreprise VALEO qui a fournis les matériaux étudié dans ce papier.

L'auteur souhaite remercier Patrick VALLADE le technicien du laboratoire SATIE pour sa patience et son aide pour la fabrication des différents composants du système de mesure.

## 8. REFERENCES

- [1] O. de la Barrière, Hlioui, S., Ben Ahmed, H., Gabsi, M., and LoBue, M. Pm axial flux machine design for hybrid traction. *Oil Gas Sci. Technol. à Rev. IFP*, 65(1) :203\_218, 2010.
- [2] Han-Wook Cho, Kyoung-Jin Ko, Jang-Young Choi, Hyun-Jae Shin, and Seok-Myeong Jang. Rotor natural frequency in high-speed permanent magnet synchronous motor for turbo-compressor application. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 47(10) :4258\_4261, Oct 2011.
- [3] Norme internationale, IEC 60404-2 Ed. 3.1 b:2008, Magnetic materials - Part 2: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of an Epstein frame CONSOLIDATED EDITION STANDARD published 06/25/2008..
- [4] L. Brugel, P. Brissonneau, A. Kedous, and J.C. Perrier. Effects of the epstein frame imperfections on the accuracy of power measurements at medium frequencies. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 41(1\_3) :230\_232, 1984.
- [5] Norme internationale, IEC 60404-10 Ed. 1.0 b:1988, Magnetic materials. Part 10: Methods of measurement of magnetic properties of magnetic sheet and strip at medium frequencies
- [6] P. Marketos, S. Zurek, A J. Moses, A Method for Defining the Mean Path Length of the Epstein Frame. *IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS*, VOL. 43, NO. 6, JUNE 2007
- [7] Philip Marketos, Stan Zurek, and Anthony J. Moses. Calculation of the mean path length of the epstein frame under non-sinusoidal excitations using the double epstein method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 320(20) :2542\_2545, 2008.
- [8] M. Jones and A.J. Moses. Comparison of the localized power loss and flux distribution in the butt and lap and mitred overlap corner configurations. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 10(2) :321\_326, Jun 1974.
- [9] D. Miyagi, T. Yamazaki, D. Otome, M. Nakano, and N. Takahashi. Development of measurement system of magnetic properties at high flux density using novel single-sheet tester. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 45(10) :3889\_3892, Oct 2009
- [10] A. Moses and S. Hamadeh. Comparison of the epstein-square and a single-strip tester for measuring the power loss of nonoriented electrical steels. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 19(6) :2705\_2710, Nov 1983.
- [11] J. Sievert. Recent advances in the one- and two-dimensional magnetic measurement technique for electrical sheet steel. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 26(5) :2553\_2558, Sep 1990.
- [12] H. Pftzner and G. Krismanic. The needle method for induction tests: sources of error. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 40(3) :1610\_1616, May 2004.
- [13] F. Brailsford. Alternating hysteresis loss in electrical sheet steels. *Electrical Engineers, Journal of the Institution of*, 84(507) :399\_407, March 1939.
- [14] N. Nencib, A. Kedous-Lebouc, and B. Cornut. Performance evaluation of a large rotational single sheet tester. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 160(0) :174\_176, 1996.
- [15] A. Ivanyi, J. Fuzi, and H. Pftzner. 2d/3d models for a three phase fed single sheet tester. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 34(5) :3004\_3007, Sep 1998.
- [16] B. Nedjar, S. Hlioui, Y. Amara, L. Vido, M. Gabsi, and M. Lecrivain. A new parallel double excitation synchronous machine. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 47(9) :2252\_2260, Sept 2011.
- [17] Fausto Fiorillo, *Measurement and Characterization of Magnetic Materials*, Elsevier book, Decembre 2004
- [18] P.K. Klimczyk, P. Anderson, A. Moses, and M. Davies. Influence of cutting techniques on magnetostriction under stress of grain oriented electrical steel. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 48(4) :1417\_1420, April 2012.
- [19] M Enokizono and JD Sievert. Magnetic field and loss analysis in an apparatus for the determination of rotational loss. *Physica Scripta*, 39(3) :356, 1989.